



# Test und Weiterentwicklung eines Streifenprojektionsgerätes

---

Zentrum für optische Technologien

Zeitraum: 01.03.2015 – 30.07.2015

**- Bachelorarbeit -**

Verfasst von:	Linda Goedicke
Studiengang:	Augenoptik/ Augenoptik und Hörakustik
Datum:	30.07.2015
Erstprüfer:	Prof. Dr. Rainer Börret
Zweitprüfer:	Prof. Dr. Peter Baumbach

## Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorthesis selbstständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und keine andere als die angegebene Literatur benutzt habe. Alle von anderen Autoren wörtlich übernommenen Stellen wie auch die sich an die Gedankengänge anderer Autoren eng anlehnenden Ausführungen meiner Arbeit sind besonders gekennzeichnet. Diese Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich während meiner Bachelorarbeit begleitet und unterstützt haben.

Zuallererst möchte ich mich bei dem gesamten ZOT-Team für die mir entgegengebrachte Unterstützung und die gute Zusammenarbeit bedanken.

Ein besonderer Dank geht an:

- meinen Betreuer, Herrn Prof. Dr. Rainer Börret, für die sehr gute Kommunikation und für die Möglichkeit meine Bachelorarbeit im Zentrum für optische Technologien an der Hochschule Aalen schreiben zu können
- meinen Betreuer, Herrn Dominik Wiedemann, der mich stets mit Anregungen und fachlichem Wissen unterstützte
- Herrn Dr. Bernd Dörband, der mir bei mathematischen Problemen zur Seite stand und mit seinem fundierten Wissen zum Erfolg der Arbeit beitrug
- meinen Zweitprüfer Herrn Prof. Dr. Peter Baumbach, der mir, durch kritisches Hinterfragen meiner Theorien, neuen Ideenanstöße gab und so den Fortschritt der Arbeit vorantrieb
- Armin Geng, der mir immer bereitwillig bei der Umsetzung meiner Ideen in Matlab half, mir sein Vorgehen verständlich erklärt hat und durch den ich mein Wissen in Matlab vertiefen konnte

Danke sagen möchte ich auch meiner Familie, ohne die ich mein Studium nicht hätte absolvieren können.

Zu guter Letzt bedanke ich mich bei meinem Freund Bernd Bäurer, der mir während der Zeit des Schreibens mit Geduld und Verständnis zur Seite stand und mich gedanklich unterstützte.

## Kurzfassung

Die Streifenprojektion hat sich im Laufe der letzten Jahre schnell neben den Koordinatenmessgeräten in der 3D-Messtechnik etabliert und ist aus diesem Bereich nicht mehr wegzudenken. Auch auf anderen Gebieten, wie beispielsweise der Medizin oder der Automobilindustrie, findet diese im Alltag Anwendung. Ein entscheidender Vorteil der Streifenprojektion besteht darin, Objekte schnell und berührungslos zu vermessen.

In der vorliegenden Bachelorarbeit wird detailliert auf ein selbstentwickeltes Streifenprojektionsgerät eingegangen, dass mit geringen finanziellen Mitteln konstruiert wurde. Hierbei wurde die Software zur Steuerung der Komponenten sowie zur Auswertung der erfassten Daten in Matlab erstellt.

Das Gerät wurde auf Benutzerfreundlichkeit untersucht und hinsichtlich dieses Aspektes verbessert. Im Zuge dessen beinhaltet die Bachelorthesis eine ausführliche Benutzeranleitung für Neuanwender.

Durch Transformation der Kalibrierung in metrische Daten kann das Streifenprojektionsgerät für zukünftige Messungen benutzt werden.

Es konnten die Fragen geklärt werden, wie reproduzierbar die Ergebnisse des Messgerätes sind und welche Messgenauigkeit erzielt werden kann. Zusätzlich erfolgte die Definition des erreichbaren Messvolumens.

Die Auswertung der durchgeführten Messversuche zeigte, dass das Gerät reproduzierbare Ergebnisse liefert. Außerdem konnte gezeigt werden, dass das Streifenprojektionsgerät in der Lage ist einfache Freiformflächen zu vermessen. Die erzeugten Messdaten können beispielsweise als Solldaten für die Vermessung mit taktilen Messmaschinen verwendet werden. Oberflächen welche scharfe Kanten, also nicht stetige Strukturen, besitzen, können mit diesem Aufbau nicht vermessen werden

## Abstract

In the last few years, fringe projection has established itself really fast in the 3D-measurement technology. Besides the coordinate measuring equipment, it has become indispensable in this field. Fringe projection is also used in other areas of application in the medical field as well as in the automotive industry. One decisive advantage of this method is the quick and contactless measurement of objects.

This bachelor thesis deals with a self-developed fringe projection system, which has been developed with low costs. In this connection the software, which controls the components and evaluates the recorded measurement data, was created with Matlab.

The system is tested and improved regarding the user-friendliness. In this context the bachelor thesis contains a detailed user instruction for inexperienced users.

Furthermore, the fringe projection system is now ready for operation due to some improvements, which were made to enable the metric calibration.

Moreover, the reproducibility of the measurements and the attainable measuring accuracy, are clarified. In addition, the adjustable measuring volume could be defined.

The evaluation of the performed measurements demonstrated that the device provides reproducible results. Beyond, it is able to determine simple free form surfaces. The generated measurement data can be effectively used as reference data for the tactile measuring systems.

It was also detected that the self-developed fringe projection system is unsuitable for measuring sharp edges.

## **Leitzitat**

„Denken und Wissen sollten immer gleichen Schritt halten.  
Das Wissen bleibt sonst unfruchtbar.“

*Friedrich Wilhelm von Humboldt*

## Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer-aided design (rechnerunterstütztes Konstruieren)
GUI	Graphical user interface (Grafische Benutzeroberfläche)
KMG	Koordinatenmessgerät
KMT	Koordinatenmesstechnik
OCT	Optische Kohärenztomografie
POM	Polyoxymethylen
PV	Peak to Valley
RMS	Root Mean Square (Quadratisches Mittel)
SPG	Streifenprojektionsgerät
WLI	Weißlichtinterferometer
ZOT	Zentrum für Optische Technologien

# Inhaltsverzeichnis

<b>Erklärung.....</b>	<b>I</b>
<b>Danksagung .....</b>	<b>II</b>
<b>Kurzfassung.....</b>	<b>III</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>IV</b>
<b>Leitzitat .....</b>	<b>V</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>VI</b>
<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>VII</b>
<b>1. Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1. Zentrum für Optische Technologien (ZOT).....	1
1.2 Entwicklung der Messtechnik.....	2
1.3. Taktile und optische Messtechnik .....	3
<b>2. Vorgehensweise .....</b>	<b>4</b>
2.1 Zielsetzung .....	4
2.2. Zeitplan der Bachelorarbeit.....	5
<b>3. Koordinatenmessgerät UPMC .....</b>	<b>6</b>
3.1 Prinzip Koordinatenmessgerät.....	6
3.2 Allgemeiner Aufbau UPMC .....	6
3.3 Taktile messende Systeme.....	8
<b>4. Weißlichtinterferometrie.....</b>	<b>11</b>
4.1 Aufbau .....	11
4.2 Allgemeines .....	11
4.3 Funktionsprinzip .....	12
<b>5. Die Streifenprojektion.....</b>	<b>14</b>
5.1 Allgemeines .....	14



5.2	Messprinzip .....	14
5.3	Korrespondenzproblem .....	16
5.3.1	Innere Orientierung.....	16
5.3.2	Äußere Orientierung .....	17
5.3.3	Phase-Shift Verfahren .....	18
<b>6.</b>	<b>Selbstentwicklung Streifenprojektionsgerät.....</b>	<b>20</b>
6.1	Versuchsaufbau.....	20
6.2	Aufbau der Benutzeroberfläche (GUI).....	24
6.3	Funktionsprinzip .....	29
6.3.1	Bildaufnahme.....	30
6.3.2	Bildauswertung .....	30
6.4	Bedienungsanleitung .....	32
6.4.1	Vorbereitung des Messsystems .....	32
6.4.2	Voreinstellung Messung .....	33
6.4.3	Kalibrierung des Streifenprojektionsgeräts.....	36
6.4.4	Referenzbild generieren .....	39
6.4.5	Objektoberfläche messen .....	40
6.4.6	Checkliste.....	42
6.5	Programmverbesserungen .....	43
6.5.1	Auswahl zwischen Grund- und erweiterter Einstellung.....	43
6.5.2	Speicherung der Messdaten als Textdatei .....	43
6.5.2	x-y Kalibrierung.....	44
6.6	Fehlerquellen.....	54
<b>7.</b>	<b>Ermittlung und Auswertung der Messergebnisse .....</b>	<b>55</b>
7.1	Software Calypso.....	55
7.2	ZAPHOD .....	55

7.3	Peak to Valley und Root Mean Square .....	56
7.4	Vergleich UPMC und Streifenprojektionsgerät .....	57
7.5	Messung der Kalibrierhäufigkeit.....	59
7.6	Messungen unter Wiederholbedingungen.....	61
7.7	Überprüfung der Reproduzierbarkeit.....	63
7.8	Überprüfung der Messgenauigkeit .....	67
7.9	Vergleich von zwei Kalibrier-/Referenzflächen .....	76
7.10	Festlegung des Messvolumens.....	79
7.11	Festlegung der Auflösungsgrenzen .....	80
<b>8.</b>	<b>Schlussfolgerung .....</b>	<b>84</b>
<b>9.</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>85</b>
<b>10.</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>87</b>
<b>11.</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>91</b>

# 1. Einleitung

## 1.1. Zentrum für Optische Technologien (ZOT)

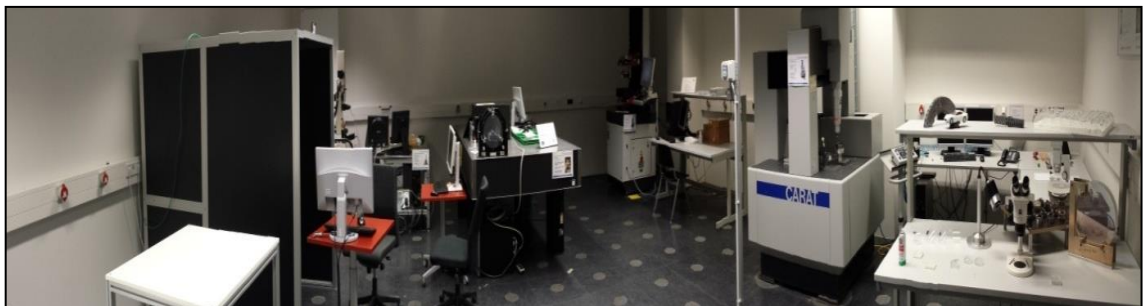
Das Zentrum für Optische Technologie, kurz ZOT, ist eine Forschungseinrichtung innerhalb der Hochschule Aalen. Der Fokus der Forschung des ZOT liegt in der Prozessentwicklung für optische Fertigungstechnologien. Desweiteren stellt das Forschungsinstitut auch eine Vielzahl an optischen Messgeräten bereit, mit denen messtechnische Aufgaben durchgeführt werden können.

Innerhalb des ZOT werden andauernd Forschungsprojekte, in enger Verknüpfung mit Partnern aus der Industrie und der Hochschule, realisiert um die Forschung weiter voranzutreiben.

Die *Abbildung 1* zeigt den Roboterraum des ZOTs, hier werden Poliersversuche durchgeführt. In *Abbildung 2* ist das Messlabor zu sehen, indem die messtechnischen Geräte stehen.



**Abbildung 1: Roboterlabor ZOT**



**Abbildung 2: Messlabor ZOT**

## 1.2 Entwicklung der Messtechnik

Die Messtechnik gewann schon sehr früh an Bedeutung. Durch das Aufblühen des Handels mit Gütern mussten Längen und Flächenmaße festgelegt werden. Damals definierte man Maße wie Elle, Fuß oder Handbreit, die sich meistens an dem Körpermaß eines Herrschers orientierten. Bei den Ägyptern nutzte man schon 4000 v.Chr. den ausgestreckten Unterarm des Königs als standardisiertes Längenmaß, dieser betrug 52,4 cm. Diese Länge wurde in sieben Handbreiten unterteilt und eine Handbreite (eine Hand = 7,48 cm) wurde wiederum in vier Fingerbreiten separiert (ein Finger = 1,87 cm). [1]

Aufgrund der vielen verschiedenen Maßeinheiten, die einen zwischenstaatlichen Handel erschwerten, wurde der Wunsch nach Vereinheitlichung immer größer. Im 18. Jahrhundert einigte man sich schließlich auf der französischen Nationalversammlung, auf ein allgemein gültiges Längenmaß, das Meter. Das Meter wurde als vierzigmillionster Teil des Erdumfangs definiert. [1]

Weitere Meilensteine in der Entwicklung der Messtechnik waren:

- die Einführung des Strichmaß als neuer internationaler Meterprototyp (1889)
- die Einführung des internationalen Einheitensystems (SI, 1960), welches die sechs Basiseinheiten festlegt (Sekunde, Ampere, Meter, Kelvin, Candela, Kilogramm)
- die Veröffentlichung des Einheitengesetzes in Deutschland (1869)
- die neue Meterdefinition auf Basis der Lichtgeschwindigkeit, demzufolge ist ein Meter die Strecke, die das Licht innerhalb von  $1/299792458$  s im Vakuum durchläuft [2]

Die einsetzende Industrialisierung drängte die Menschen dazu, in möglichst kurzer Zeit eine große Anzahl an Produkten mit herausragender Qualität zu fertigen. Die Anforderung an die hohe Leistungsfähigkeit und an die Fertigungsgenauigkeit erforderte einen hohen Anspruch an die Messgeschwindigkeit und an die Messgenauigkeit messtechnischer Geräte. Um diesen Anforderungen gerecht werden zu können, musste die Entwicklung der Messtechnik schnell und effektiv vorangetrieben werden. So entstanden in den 70er Jahren CNC-Koordinatenmessgeräte und in den 80er Jahren hielten sodann auch optische Messverfahren Einzug in den Markt. [2] Mittlerweile ist die 3D-Messtechnik aus dem Bereich der Qualitätssicherung nicht mehr wegzudenken.

### **1.3. Taktile und optische Messtechnik**

Die taktilen und optischen 3D-Messverfahren ermöglichen eine genaue Erfassung der Topographie eines Objektes und können somit mögliche Formabweichungen von der Sollform feststellen. Die optische Messtechnik stellt eine bahnbrechende Erfindung dar, da sie sich durch eine hohe Leistungsfähigkeit auszeichnet. Lediglich eine Messsequenz ermöglicht die Erfassung eines flächigen Bereichs einer Messszene.

Die optischen Messverfahren reichen von eindimensional messenden Abstandssensoren, über zweidimensionale Messverfahren (Lichtschnittverfahren) bis hin zu dreidimensionalen Verfahren, die zum Beispiel in der Streifenprojektion Anwendung finden.

Die optische und die taktile 3D-Messtechnik beruhen beide auf dem gleichen Grundprinzip: „Beide Verfahren stützen sich zur Maßberechnung und Formbestimmung auf Objektpunkte, die in einem dreidimensionalen Koordinatensystem definiert sind.“ [3]

Jedoch sind klare Unterschiede der beiden Verfahren in der Objektpunktaufnahme und der Objektpunktzahl herauszustellen. Die optische Messtechnik ermöglicht ein berührungsloses und sehr schnelles Erfassen des Oberflächenprofils eines Objekts, so dass man auch verformbare und sehr weiche Objekte zerstörungsfrei und in kürzester Zeit vermessen kann. Die taktile Messtechnik fährt das Objekt bei Vermessung an, was zu fehlerhaften Messungen führen kann. Dennoch ist die hohe Messgenauigkeit der taktilen 3D-Messtechnik nicht von der Hand zu weisen, die aufgrund der hohen Anzahl der zu antastenden Objektpunkte gegeben ist. [4]

Weiterhin stellt das Erfassen von Freiformflächen in der optischen Messtechnik eine Herausforderung dar, wohingegen diese mit der taktilen Messtechnik einfacher detektiert werden können. Die vorliegende Bachelorarbeit befasst sich aus diesem Grund mit einem Streifenprojektionsgerät, das zwar zu den optischen Geräten gehört, jedoch in der Lage ist Freiformflächen zu erfassen.

Daher wird in der Arbeit ausschließlich auf die taktile 3D-Messtechnik, die Koordinatenmesstechnik und auf die optische 3D-Messtechnik, die Streifenprojektion und die Weißlichtinterferometrie eingegangen.

## 2. Vorgehensweise

### 2.1 Zielsetzung

Das Thema der Bachelorarbeit lautet **„Test und Weiterentwicklung eines Streifenprojektionsaufbaus“**, darunter versteht man folgende Ziele, die im Laufe der Arbeit erreicht werden sollen:

- Durchführung diverser Probemessungen, die zum „Kennenlernen“ des Gerätes dienen
- Erstellung einer Benutzeranleitung, die eine detaillierte Beschreibung beim Vorgehen einer Messung enthält
- Erarbeitung möglicher Verbesserungen, zum Beispiel:
  - Verbesserungen, die der erleichterten Bedienung des Streifenprojektionsgeräts dienen
  - Verbesserungen im Programm
- Durchführung einiger sinnvoll ausgewählten Messungen, die das Streifenprojektionsgerät hinsichtlich einiger ausgewählter Aspekte testen soll:
  - Überprüfung der Messgenauigkeit des Geräts
  - Festlegung des Messvolumens
  - Test der Reproduzierbarkeit
  - Bestimmung der Auflösungsgrenzen
- Prüfen, ob das Streifenprojektionsgerät zur Definition von Sollformen für andere messtechnische Geräte geeignet ist

## 2.2. Zeitplan der Bachelorarbeit

Ablauf	Name der Aufgabe	Anfang	Abschluss	Dauer in Tage	März 2015	April 2015	Mai 2015	Juni 2015	Juli 2015
1	<b>Theoretischer Teil</b>	01.03.2015	30.06.2015	87					
2	Literaturrecherche	01.03.2014	30.06.2016	87					
3	Erstellen einer Grobgliederung	29.04.2015	04.05.2015	6					
4	Erstellen des Theorieteils	01.03.2014	30.06.2015	87					
5	<b>Praktischer Teil Beginn der Bachelorarbeit</b>	01.03.2014	10.07.2015	95					
6	Einarbeitung in die Benutzung des Streifenprojektionsgeräts	02.03.2015	31.03.2015	22					
7	Anfertigen einer Benutzeranleitung	25.03.2014	16.04.2014	17					
8	Programm-Verbesserungen, u.a. hinsichtlich x-y-Kalibrierung	17.04.2015	29.05.2014	28					
10	Vorüberlegungen zu möglichen Messungen	01.06.2015	05.06.2015	2					
11	Wiederholbarkeitsmessung	08.06.2015	08.06.2015	1					
12	Festlegung Messvolumen	09.06.2015	09.06.2015	1					
13	Überprüfung der Reproduzierbarkeit	10.06.2015	12.06.2015	2					
14	Überprüfung der Messgenauigkeit	15.06.2015	24.06.2015	8					
15	Bestimmen der Auflösungsgrenzen	25.06.2015	03.07.2015	7					
16	Zusammenführen der Ergebnisse	01.07.2015	14.07.2015	10					
17	Fertigstellen der Arbeit: Layout, Druck und Binden	15.07.2015	29.07.2015	9					
18	<b>Abgabe der Bachelorarbeit</b>	30.07.2015	30.07.2015	1					

Abbildung 3: Zeitplan

### **3. Koordinatenmessgerät UPMC**

#### **3.1 Prinzip Koordinatenmessgerät**

„Die Koordinatenmesstechnik (KMT) ist ein universelles Messverfahren, bei dem die Werkstückoberfläche in einem Koordinatensystem punktweise abgetastet und in der anschließenden Auswertung im Rechner entsprechend der Messaufgabe verknüpft wird.“ [5]

Nach dem das Werkstück punktweise abgetastet wurde, erfolgt die mathematische Verknüpfung der Antastpunkte und man erhält die Istform des Werkstücks. Durch das Erfassen der Istform ist es möglich Abweichungen zur Sollform zu erkennen. [2] Daher werden Koordinatenmessgerät vor allem für die Bestimmung von Lagebeziehungen, Formabweichungen, Maße, Abstände und Winkel eingesetzt. Je mehr Messpunkte die UPMC erfasst, umso genauer kann man die tatsächliche Werkstückoberfläche bestimmen.

Die mathematische Verknüpfung, die auch als Koordinatentransformation bezeichnet wird, ist notwendig, da das Koordinatenmessgerät (KMG) und das Werkstück voneinander unabhängige Koordinatensysteme darstellen, die ineinander überführt werden müssen. Der Ausgangspunkt der Koordinatentransformation besteht darin, dass man ein Koordinatensystem für ein Werkstück definiert. Dazu werden mehrere Stellen am Werkstück angetastet und „durch eine räumliche Koordinatentransformation können dann alle Messpunkte im KMG-Koordinatensystem auf das Werkstücksystem umgerechnet werden.“ [5]

#### **3.2 Allgemeiner Aufbau UPMC**

Koordinatenmessgeräte gibt es in unterschiedlichen Bauarten, zwischen denen je nach Messaufgabe gewählt werden kann. Man unterscheidet zwischen Auslegerbauweise, Portalbauweise, Ständerbauweise und Brückenbauweise.

Die UPMC Carat 550, welche im ZOT vorhanden ist, ist in Portalbauweise mit beweglichem Portal ausgelegt. Daher wird im Weiteren nur auf diese Konstruktionsart eingegangen.

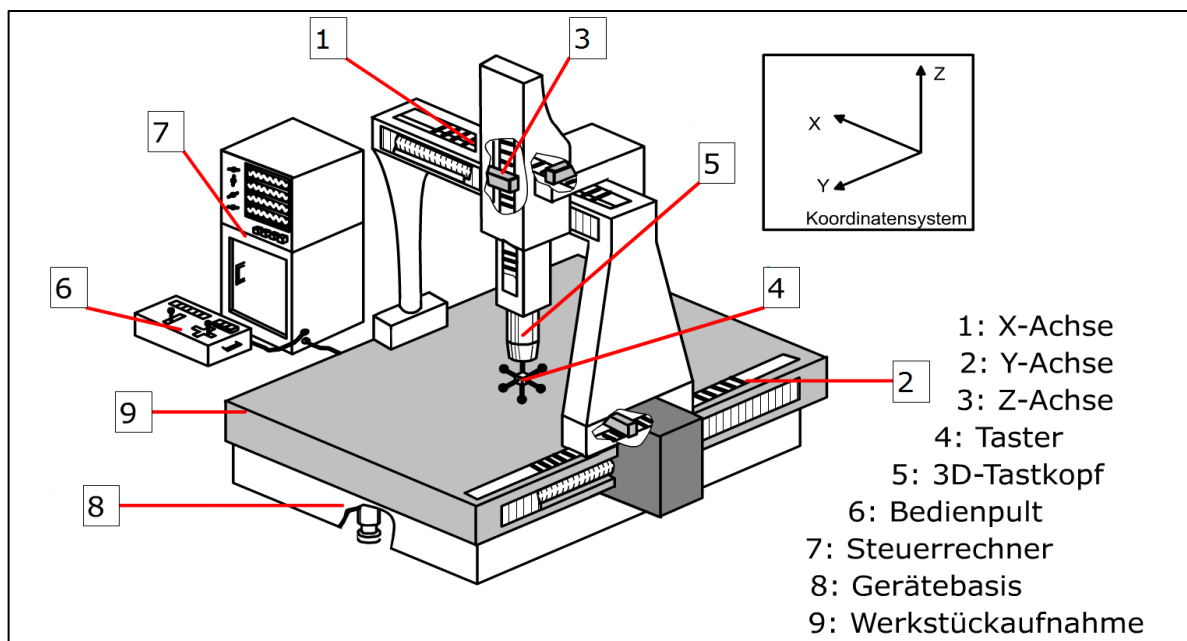


KMG in Portalbauweise zeichnen sich durch eine hohe Steifigkeit aus, die durch die in sich geschlossene Bauweise des Portals und durch die Luftlagerung des Portals gegeben ist. Aufgrund der hohen Steifigkeit ist es möglich kleine Messunsicherheiten bei großen Messbereichen zu erreichen. [2] Ein wesentlicher Vorteil der KMG mit beweglichem Portal besteht darin, dass auch schwere Werkstücke mit hoher Messgenauigkeit gemessen werden können. [6]

In *Abbildung 4* ist ein KMG in Portalbauweise zu sehen. Im Allgemeinen bestehen Koordinatenmessgeräte aus drei zueinander orthogonal angeordneten Achsen (x, y, z). Jede dieser Achsen besitzt einen eigenen elektrischen Antrieb. Der Tisch zur Werkstückaufnahme besteht meist aus Granit, Stahl oder Gusseisen. Bei der UPMC Carat 550 von Zeiss ist der Tisch aus Granit, aufgrund seiner hohen Korrosionsbeständigkeit, der geringen Dichte und des, im Vergleich zu den anderen zwei Materialien, niedrigen Preises. Des Weiteren steht der Tisch auf einer Gerätebasis, die durch ihre Dämpfungsmatten Umgebungsschwingungen vom Messgerät abhält. [5]

Die Messköpfe oder auch Sensoren tasten das Werkstück ab und liefern Informationen über den Prüfling. Es wird hierbei zwischen optischen (berührungslosen) und taktilen (berührenden) Messköpfen unterschieden (s. *Punkt 3.4*).

Damit die Messpunkte auch weiter verarbeitet werden können und damit eine Aussage über die Abweichung zur Sollgestalt liefern, braucht jedes KMG einen Rechner mit einer geeigneten Messsoftware (s. *Punkt 7.1*).



**Abbildung 4: Aufbau KMG in Portalbauweise [7]**

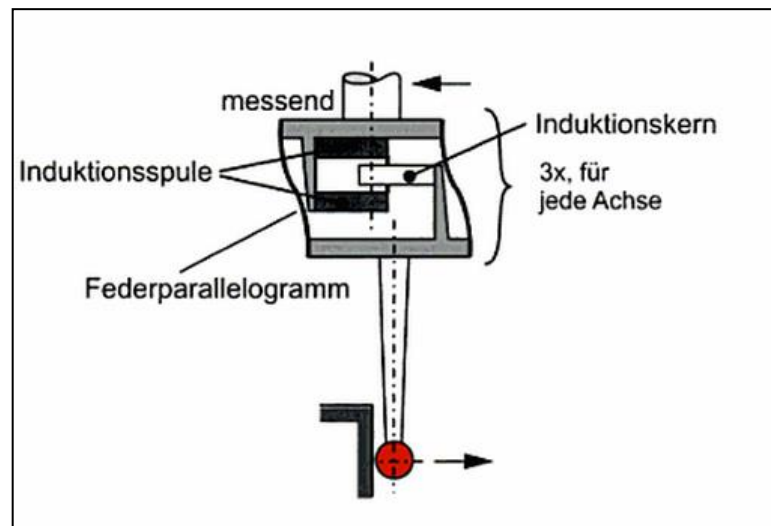
### 3.3 Taktile messende Systeme

Beim taktilen Messen erfolgt das Abtasten der Oberflächentopographie eines Werkstücks durch einen berührenden Taster.

Das tastende Messkopfsystem der Zeiss UPMC 550 Carat, das das Signal zur Bestimmung des Messpunktes gibt, besteht aus einer Pinole, einem Messkopf und dem daran anschließenden Tastersystem. Der taktile Messkopf stellt eine Beziehung zwischen dem Koordinatensystem des KMG und den Antastpunkten des Werkstücks auf. [5]

Taktile Messköpfe unterscheiden sich in zwei Arten des Antastens: messende Systeme und schaltende Systeme.

Die UPMC Carat 550 von Zeiss arbeitet nach dem in *Abbildung 5* dargestellten messenden Systems. „Bei messenden Systemen wird [die] Relativbewegung [die beim Antasten des Werkstücks auftritt] durch Wegmesssysteme, meist analoge Induktivtaster, erfasst und zur Ermittlung der Koordinaten des Antastpunktes den, mit den Messsystemen der Verschiebeschlitten ermittelten Koordinaten, überlagert.“ [1]. Auf das schaltende System soll nicht weiter eingegangen werden. Nähere Informationen findet man in der Bachelorarbeit von Hülya Tasgin (Vermessung von Freiformflächen mit einer Koordinatenmessmaschine, Hochschule Aalen 2013).

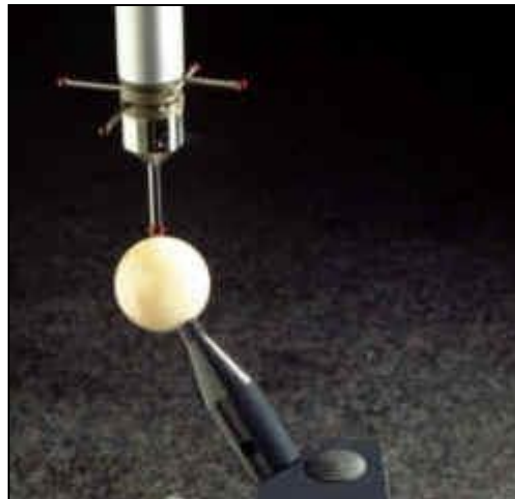


**Abbildung 5: Taktile Messkopf bei messendem System[5]**

Das Messverfahren bei messenden Tastsystemen kann auf zwei unterschiedlichen Weisen erfolgen: als Einzelpunktmessung oder als Scanningverfahren. Bei der Einzelpunktmessung wird, während sich die Achsen bewegen, eine Stelle am Werkstück vom Taster angefahren.

Nach dem Antasten fährt der Taster zurück und bewegt sich erneut vor. Beim Scanningverfahren hingegen fährt das Tasterelement kontinuierlich, ohne Unterbrechungen, entlang der Oberflächenkontur des Messobjekts. Ein entscheidender Vorteil des Scanningverfahrens besteht in dem sehr schnellen Erfassen von vielen Messpunkten in kürzester Zeit (200 Messpunkte pro Sekunde). [5]

Damit wichtige Größen des Tastersystems, wie Tasterradius und Tasterbiegung für die Software Calypso zur Verfügung stehen, muss das Tastersystem vor der Messung an einer Referenzkugel eingemessen werden. Bei jedem Wechsel des Tasters muss dieser erneut an der Kugelnormalen kalibriert werden. Die Kalibrierung an der Kugelnormalen (s. *Abbildung 6*) ist wichtig, um die Messgenauigkeit der KMG zu erhöhen und Messfehler zu vermeiden.



***Abbildung 6: Einmessung des Tasters an der Kugelnormalen [7]***

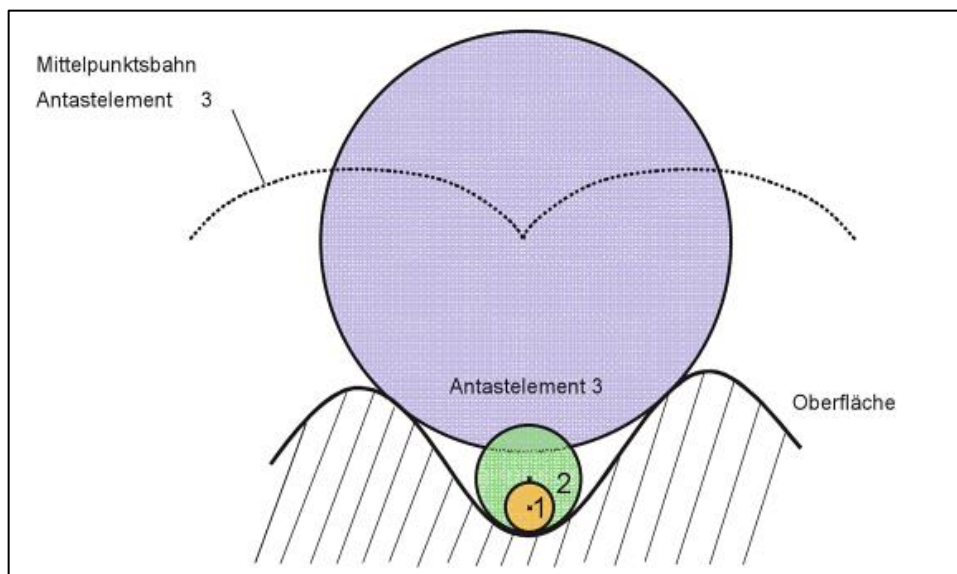
Ein Bestandteil des Tastersystems ist das Tastelement, das durch unterschiedliche Formen verschiedene Messaufgaben lösen kann. Für die taktile Messung müssen Form, Größe und Material des Tastelements bekannt sein. Bei der UPMC von Zeiss wird eine Rubinkugel als Tastelement verwendet. Um beim Einmessen eine hohe Messgenauigkeit zu erreichen, braucht das Tastelement eine sehr hohe Formgenauigkeit. Rubin ist ein harter Werkstoff und minimiert daher den Verschleiß des Tastelements. Aufgrund der Tastkräfte, die bei der berührenden Oberflächenmessung auftreten können, kann es zu Deformationen an der Rubinkugel oder an der Werkstückoberfläche kommen. [8]

Der Radius der Rubinkugel bestimmt ob Teile der Oberfläche des Werkstücks angetastet werden oder nicht. „Die Größe des Antastelements führt zu einer Verfälschung der Oberfläche, die als mechanische Filterung bezeichnet wird.“ [9]

In

*Abbildung 7* wird deutlich, dass Antastelement 1 und Antastelement 2 keine mechanische Filterung bewirken, wohingegen Antastelement 3 zu einer mechanischen Filterung führt, da die Oberfläche des Prüflings nicht vollständig erfasst werden kann.

Im Allgemeinen gilt: Je größer das Antastelement desto stärker die mechanische Filterung.



**Abbildung 7: Mechanische Filterung des Antastelements [9]**

## 4. Weißlichtinterferometrie

Die Topographie der Referenzobjekte, die in der vorliegenden Bachelorthesis verwendet werden, wurde mit dem Weißlichtinterferometer von Zygo gemessen.

### 4.1 Aufbau

In *Abbildung 8* ist der Aufbau des Zygo Weißlichtinterferometers dargestellt.



*Abbildung 8: Aufbau des Weißlichtinterferometers Zygo*

### 4.2 Allgemeines

Wie in *Punkt 1.3* bereits erwähnt wurde, zählt die Weißlichtinterferometrie zu den dreidimensionalen optischen Messverfahren und basiert auf dem Grundprinzip der Interferometrie, bei der es zur Überlagerung der Wellen zweier Lichtstrahlen kommt.

Das Weißlichtinterferometer ist ebenso, wie die Streifenprojektion, ein berührungsloses Messverfahren und wird zur zerstörungsfreien Messung von rauen Oberflächen eingesetzt.

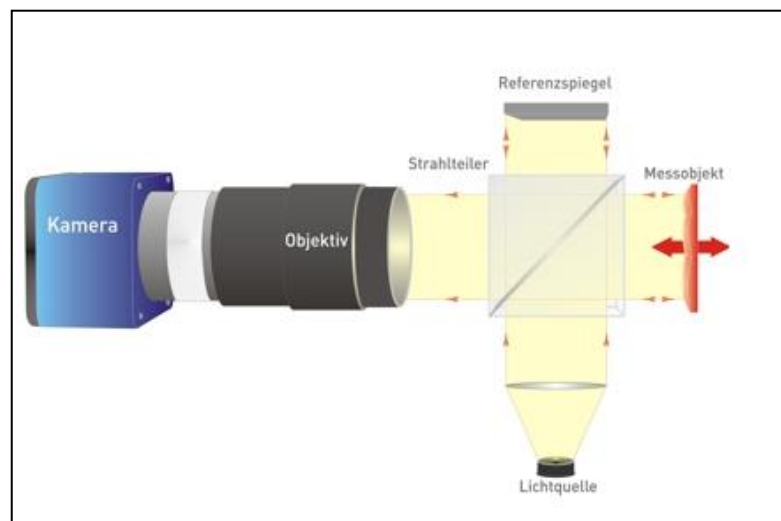
Die Weißlichtinterferometrie findet Anwendung in der Qualitätssicherung, Forschung und im klinischen Alltag. Typische Einsatzfelder hierbei sind die Prüfung von Mikrostrukturen, die Bestimmung von Stufenhöhen und die Messung von gekrümmten Oberflächen wie zum Beispiel von Mikrolinsen. [10]

Im klinischen Alltag wird das Prinzip der Weißlichtinterferometrie in der Optischen Kohärenz Tomographie (OCT) eingesetzt. Unter OCT wird die Ophthalmologie zur Diagnostik retinaler Schäden verstanden. Die kontaktlose Methode ermöglicht eine nichtinvasive Untersuchung, die die Bildgebung im streuenden Medium erlaubt. Es können axiale Auflösungen von  $1 - 1,5 \mu\text{m}$  erreicht werden. [11]

### 4.3 Funktionsprinzip

Wie der Name Weißlichtinterferometer schon verrät, wird weißes Licht, das bekanntlich eine sehr kurze Kohärenzlänge ( $1 - 2 \mu\text{m}$ ) hat, verwendet.

In *Abbildung 9* ist das Prinzip der Weißlichtinterferometrie schematisch dargestellt. Das weiße Licht gelangt über einen Strahlteiler in das Messgerät. Der eine Teil des Strahls, der zuvor an dem Strahlteiler aufgeteilt wurde, wird am Referenzspiegel, der andere Teil am Prüfling reflektiert. Auf dem Rückweg überlagern sich diese beiden Strahlen und durchlaufen anschließend ein Mikroskopobjektiv mit eingebautem Mirau-Interferometer.



**Abbildung 9: Prinzip Weißlichtinterferometer [14]**

Entspricht die Weglänge des Lichts zwischen Objektiv und auszumessendem Objekt derselben Weglänge des Lichtes im Interferometer werden sogenannte Weißlichtinterferenzen sichtbar, die von der Kamera aufgenommen werden. [12]

Daraufhin wertet die Software die aufgenommenen Interferenzen aus und ordnet jedem Pixel einen Höhenwert zu. Wird das Messobjekt entlang der optischen Achse verfahren, entsteht eine Höhenkarte des ausgemessenen Objektes. Das Höhenprofil des auszumessenden Objekts variiert über die Messapparatur hinweg, weshalb sich auch die optische Weglänge im Objektarm ändert. Die Weißlichtinterferenzen sind nur zu beobachten in den Bereichen, in denen sich das Höhenprofil des Prüflings nicht ändert und damit auch die Weglängen von Mess- und Referenzarm konstant bleiben. [13]

Das Weißlichtinterferometer kann diese topographische Karte mit einer Genauigkeit, die im sub- $\mu\text{m}$ -Bereich liegt, ausgeben, weshalb es auch möglich ist steile Stufen zu messen. [14]

Ein wesentlicher Vorteil des Verfahrens liegt in der hohen vertikalen Messauflösung - „Höhenunterschiede von weniger als 0,1 nm sind feststellbar.“ [1]

## 5. Die Streifenprojektion

### 5.1 Allgemeines

Die Streifenprojektion ist ein relativ junges Messverfahren und findet Anwendung in diversen Bereichen, wie zum Beispiel in der Automobilindustrie, in der Archäologie, in der Forensik und in der Qualitätskontrolle.

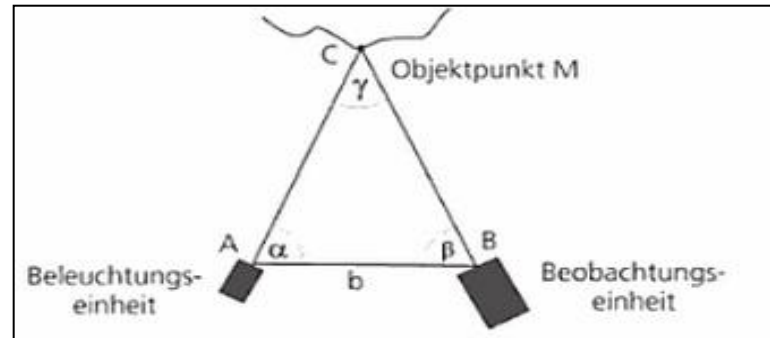
In der Automobilindustrie wird die Streifenprojektion zur Deformationsmessung genutzt. In der Archäologie dient sie zur Dokumentation des aktuellen Zustands kulturhistorischer Objekte, die bei einer späteren Restauration nützlich sein können. In der Forensik kann mit Hilfe dieses Verfahrens ein 3D-Bild vom Tatort erstellt werden, zum Beispiel eines Fußabdrucks. Das Bild kann daraufhin analysiert und auf Spuren untersucht werden ohne dass die Ermittler den Tatort betreten müssen und dadurch gegebenenfalls wichtige Beweisspuren vernichten. [15]

Die Streifenprojektion zeichnet sich neben den oben genannten Vorteilen auch durch einen simplen und mobilen Aufbau aus. Jedoch besteht ein entscheidender Nachteil des optischen Messgeräts in der eingeschränkten Messung von Objekten. Es können lediglich matte Oberflächen vermessen werden um Reflexionen und damit schlechte Messergebnisse zu vermeiden. Will man dennoch reflektierende Objekte ausmessen, muss deren Oberfläche vor der Vermessung vorbehandelt werden. Ein weiterer negativer Aspekt zeichnet sich dadurch aus, dass Vertiefungen in Objekten nur bedingt von der Streifenprojektion erfasst werden können. Sind die Vertiefungen zu groß, entstehen Schattenränder und somit keine auswertbaren Informationen für das Streifenprojektionsgerät.

### 5.2 Messprinzip

Bei der Streifenprojektion wird ein periodisch wiederkehrendes Streifenmuster von einem Projektor auf ein Objekt projiziert, von einer Kamera erfasst und anschließend ausgewertet. Fast alle Streifenprojektionsgeräte beruhen auf dem Messprinzip der in *Abbildung 10* dargestellten Triangulation.

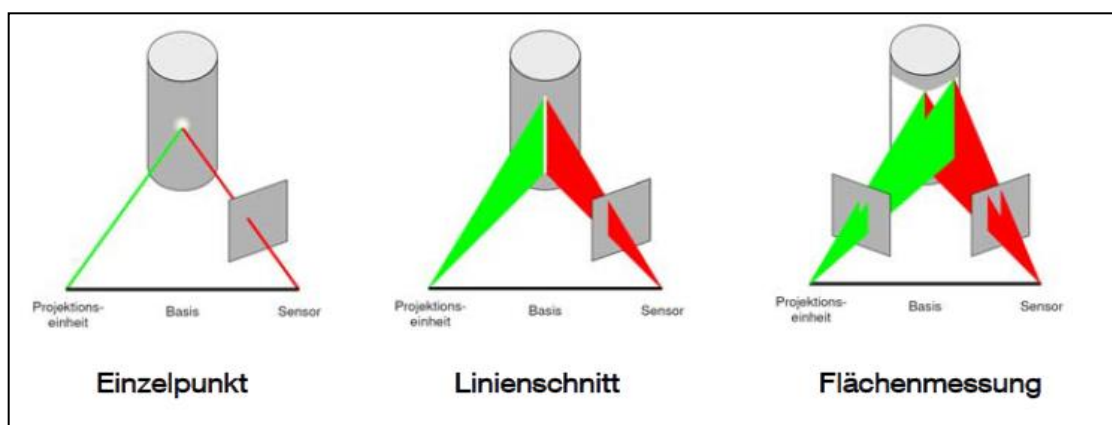




**Abbildung 10: Triangulationsprinzip [16]**

Unter dem Messprinzip der Triangulation wird vereinfacht die Bestimmung der Strecke AC und somit der räumlichen Lage des Objektpunktes M, durch die Ermittlung zweier Dreieckswinkel ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) unter Kenntnis der Länge der von ihnen eingeschlossenen Dreiecksseite (Strecke AB) verstanden. Somit kann für jeden Bildpunkt mit Hilfe des aufgenommenen Streifenbildes die Lage des zugehörigen Objektpunktes bestimmt werden. Bei den Triangulationsverfahren wird zwischen aktiv und passiv messenden Verfahren differenziert. Passive Messsysteme erfordern keine spezielle Beleuchtung des Objektes, die meisten beschränken sich auf diffuse Beleuchtung oder Umgebungslicht. Durch Auswertung von den Pixelpositionen der Objektpunkte in der Bildebene einer Bildaufnahme gewinnt man die nötigen Informationen über das Messobjekt. [16]

Aktiv messende Systeme dagegen benötigen eine spezielle Beleuchtung des Objekts (Laser, LED-Lichtquellen). Bei den aktiven Triangulationssystemen wird zwischen drei Arten der Abtastung unterschieden. Diese sind in *Abbildung 11* dargestellt.



**Abbildung 11: Prinzipien der aktiven Triangulation mit strukturierter Beleuchtung [17]**

Bei der **Einzelpunktmessung** (eindimensionales Verfahren) wird ein Lichtpunkt (Laser) auf ein Objekt projiziert. Das vom Objekt reflektierte Licht wird danach von einem Sensor erfasst. Möchte man die gesamte Oberfläche des Messobjektes erfassen, muss der Lichtpunkt in vertikaler und in horizontaler Richtung verschoben werden.

Das zweidimensionale Verfahren stellt die **Linienschnittmessung** dar. Hierbei wird eine Linie auf das Objekt geworfen und anschließend von einer Kamera erfasst. Durch das Verschieben der Linie in vertikaler oder horizontaler Richtung kann die gesamte Oberfläche detektiert werden.

Bei der **Flächenmessung** (dreidimensionales Verfahren) wird, wie der Name schon sagt, ein flächenhaftes und räumlich strukturiertes Muster auf die Objektoberfläche projiziert und von einer Kamera erfasst. Bei diesem Verfahren entfällt die Verschiebung, da eine ganze Messszene aufgenommen werden kann. Die Flächenmessung findet bei der Streifenprojektion Anwendung. [18]

### 5.3 Korrespondenzproblem

Ein Problem der optischen Triangulation stellt das Korrespondenzproblem dar.

Das Korrespondenzproblem beschreibt die Aufgabe, identische Objektmerkmale in mehreren Bildern zu identifizieren und einander zuzuordnen. Ist die Zuordnung erfolgt, lassen sich bei bekannter innerer und äußerer Orientierung der Kamera die Objektkoordinaten bestimmen. [17]

#### 5.3.1 Innere Orientierung

Unter der inneren Orientierung wird die Lage des Projektionszentrums im Bildraum verstanden, die durch drei konstante Parameter (s. *Abbildung 12*) festgelegt ist:

- Kamerakonstante  $C_k$
- Hauptpunktlage  $H'$  ( $X_H$ ,  $Y_H$ )
- Radialsymmetrische Verzeichnung

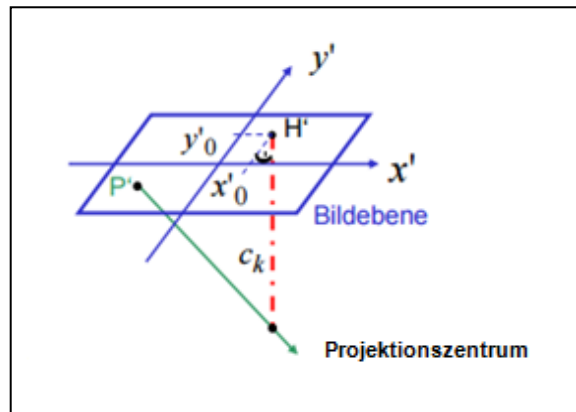


Abbildung 12: Parameter der inneren Orientierung [19]

Die *Kamerakonstante*  $C_k$  wird definiert als der lotrechte Abstand des Projektionszentrums zur Bildebene und entspricht in etwa der Brennweite des verwendeten Objektivs. [16]

Die *Hauptpunktlage*  $H'$  (Koordinaten  $X_H, Y_H$ ) beschreibt die Abweichung der optischen Achse von der Bildmitte. Die *Radialsymmetrische Verzeichnung* wird durch die Änderung der Brechzahl der Linse beeinflusst.

### 5.3.2 Äußere Orientierung

Die äußere Orientierung der Kamera beschreibt die Lage des Projektionszentrums in Bezug zum Objektraum, die durch sechs variierende (Bewegungen der Kamera) Parameter festgelegt ist (s. *Abbildung 13*):

- Koordinaten des Projektionsraums ( $X_0, Y_0, Z_0$ )
- Neigungswinkel der Kamera ( $\omega, \phi, \kappa$ )

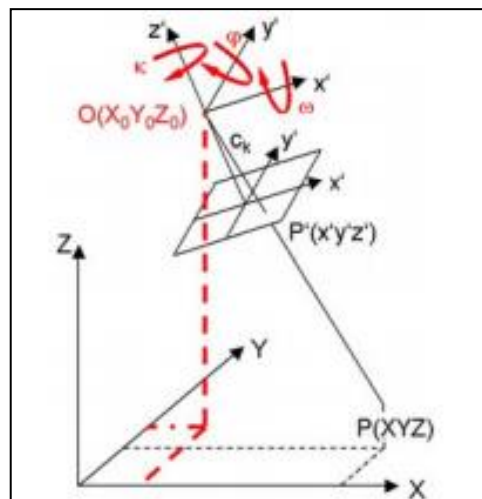


Abbildung 13: Parameter der äußeren Orientierung [19]

### 5.3.3 Phase-Shift Verfahren

Eine geeignete Lösung des Korrespondenzproblems bietet das am häufigsten verwendete Phase-Shift Verfahren. Natürlich gibt es noch andere Verfahren, die hierbei möglich wären, aber da für die vorliegenden Bachelorarbeit nur das Phase-Shift Verfahren relevant ist, soll lediglich auf dieses eingegangen werden.

Beim Phase-Shift Verfahren wird ein sinusförmiges Muster phasenverschoben auf das Messobjekt projiziert. Phasenverschoben heißt, dass das Streifenmuster in der Regel viermal, jeweils um die Phase  $\pi/2$  verschoben, auf das Objekt trifft (s. *Abbildung 14*).



**Abbildung 14: Streifenmuster jeweils 4x um 90 Grad verschoben [20]**

Für jeden Bildpunkt werden mit der *Gleichung 5.1* vier Intensitätswerte ermittelt, die durch folgende Formel bestimmt werden können:

$$I_n(x, y) = I_0 \times (1 + \gamma(x, y) \times \cos(\varphi(x, y) + \varphi_m)) \quad [21] \quad (5.1)$$

Mit:

$I_0$ : Hintergrundintensität

$\gamma(x, y)$ : Amplitude des sinusförmig moduliertem Intensitätssignals

$\varphi(x, y)$ : Phasenlage innerhalb einer Periode

$\varphi_m$ : Phasendifferenz

$n$ : 1-4

Das Ziel ist es, die Phasenlage zu bestimmen und durch den gemessenen Grauwert jedem Punkt im Bild die exakten Koordinaten auf dem Objekt zu zuweisen.

Die Phasenlage wird aus der oben genannten *Gleichung 5.1* wie folgt berechnet:

$$I_1(x, y) = I_0 \times (1 + \gamma(x, y) \times \cos(\varphi(x, y) + 0^\circ)) = I_0 \times \gamma(x, y) \times \cos(\varphi(x, y))$$

$$I_2(x, y) = I_0 \times (1 + \gamma(x, y) \times \cos(\varphi(x, y) + 90^\circ)) = I_0 \times \gamma(x, y) \times -\sin(\varphi(x, y))$$

$$I_3(x, y) = I_0 \times (1 + \gamma(x, y) \times \cos(\varphi(x, y) + 180^\circ)) = I_0 \times \gamma(x, y) \times -\cos(\varphi(x, y))$$

$$I_4(x, y) = I_0 \times (1 + \gamma(x, y) \times \cos(\varphi(x, y) + 270^\circ)) = I_0 \times \gamma(x, y) \times \sin(\varphi(x, y))$$

Im nächsten Schritt subtrahiert man  $I_4(x,y)$  von  $I_2(x,y)$  und  $I_3(x,y)$  von  $I_1(x,y)$  und erhält die *Gleichung 5.2*:

$$\frac{I_4 - I_2}{I_3 - I_1} = \frac{2I_0 k \times \sin(\varphi(x,y))}{2I_0 k \times \cos(\varphi(x,y))} = \tan(\varphi(x,y)) \quad (5.2)$$

Durch Umstellen der Formel kann nun die Phasenlage mit der *Gleichung 5.3* berechnet werden:

$$\varphi(x,y) = \arctan\left(\frac{I_4 - I_2}{I_3 - I_1}\right) \quad (5.3)$$

Ein Nachteil des Phase-Shift Verfahrens besteht darin, dass das Ergebnis nur im Bereich zwischen  $-\pi$  und  $+\pi$  eindeutig ist. Kanten oder Stufen im Objekt führen zu Phasensprüngen. Sind die Sprünge größer als  $\pi$  können diese nicht eindeutig erkannt werden. [20]  
Um dieses Problem zu beheben gibt es mehrere Lösungsansätze. Beim „Studentenaufbau“ wurde ein Unwrapped-Algorithmus verwendet (s. *Punkt 6.3.2*).

## 6. Selbstentwicklung Streifenprojektionsgerät

### 6.1 Versuchsaufbau

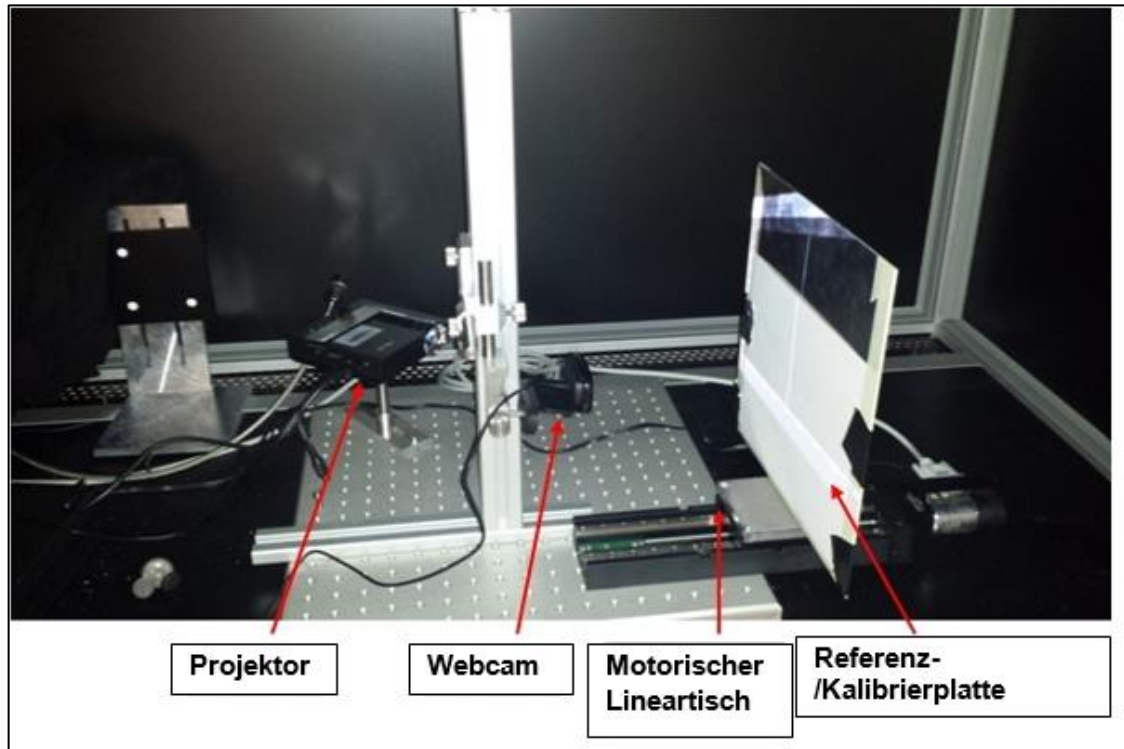


Abbildung 15: Streifenprojektionsaufbau

Für den Streifenprojektionsaufbau wurden folgende Komponenten verwendet:



Abbildung 16: Webcam C615 von Logitech [22]

- Marke: Logitech
- Modell: C615
- Auflösung: 1920 x 1080
- Bit-Tiefe: 8 Bit
- Preis: 89,99 €



**Abbildung 17: Projektor P1M von Asus [23]**

- Marke: Asus
- Modell: P1M
- Auflösung: 1280 x 800
- Projektionsdistanz: 0,5 – 3 Meter
- Preis: ca. 600 €

Der Streifenprojektionsaufbau befindet sich innerhalb einer schwarzen Box, der sogenannten Black Box (s. *Abbildung 18*), um Überbelichtung und störende Reflexe zu vermeiden.



**Abbildung 18: Black Box**

Die Kalibrierung erfolgt auf einer motorisierten Linearachse (s. *Abbildung 19*). Auf dem Mikrostelltisch wird die Kalibrierplatte befestigt und an unterschiedliche Position gefahren. Die Ansteuerung des Tisches erfolgt dabei rechnergesteuert.



**Abbildung 19: Linearachse mit Mikrostelltisch [24]**

- Marke: PI (Piezo Technology)
- Modell: M-404
- Auflösung: bis  $0,012\ \mu\text{m}$
- kleinste Schrittweite: bis  $0,1\ \mu\text{m}$

Eine Edelstahlplatte (s. *Abbildung 20*) wird für die Kalibrierung und als Referenzplatte verwendet. Diese wurde später gegen eine Glasplatte ausgetauscht (s. *Punkt 7.9*).



**Abbildung 20: Referenz-/Kalibrierplatte aus Edelstahl**



Als Objektträger dient ein Stativ (s. *Abbildung 21*), damit die Messobjekte stabil eingespannt werden können.



***Abbildung 21: Objektträger***

## 6.2 Aufbau der Benutzeroberfläche (GUI)

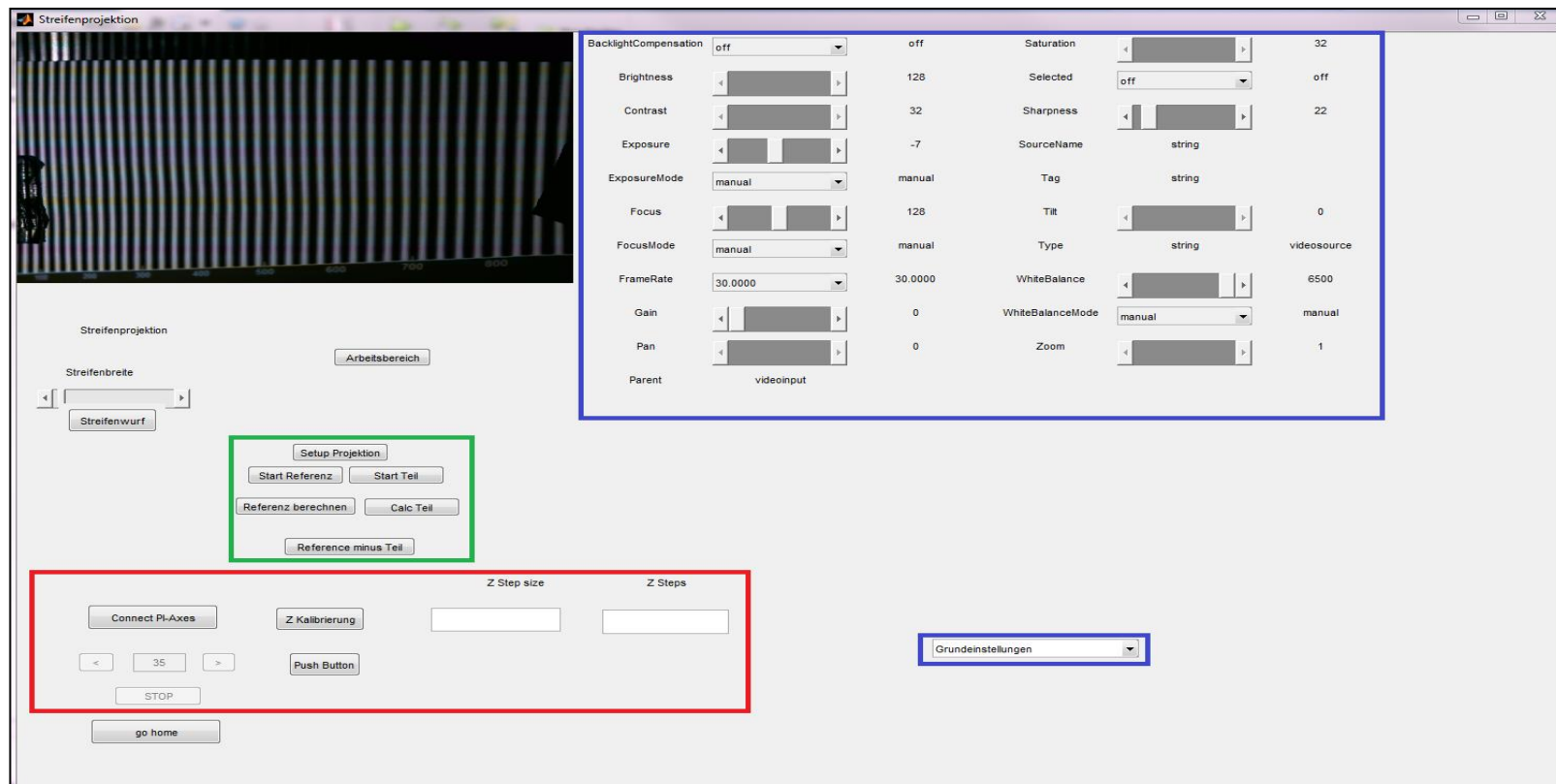


Abbildung 22: Aufbau der GUI, rot: Steuerung von Lineartisch (links) und Parameter für metrische Kalibrierung (rechts), grün: Parameter zur Steuerung der Streifenprojektion, blau: Parameter zur Steuerung der Webcam

In *Abbildung 23* sind die Parameter dargestellt, mit denen die Webcam vor einer Messung eingestellt werden kann. Für den Erstbenutzer empfiehlt sich die Grundeinstellung. Als erfahrener Bediener eignet sich die erweiterte Einstellung, mit der sich noch weitere Parameter ändern lassen.

BacklightCompensation	off	off	Saturation	32
Brightness	128	Selected	off	off
Contrast	32	Sharpness	22	
Exposure	-7	SourceName	string	
ExposureMode	manual	Tag	string	
Focus	128	Tilt	0	
FocusMode	manual	Type	string	videosource
FrameRate	30.0000	WhiteBalance	6500	
Gain	0	WhiteBalanceMode	manual	manual
Pan	0	Zoom	1	
Parent	videoinput			

## Erklärung der Begriffe:

**BlacklightCompensation:** Gegenlichtausgleich

**ExposureMode:** manuell oder automatisch

**Exposure:** Belichtungszeit

**Focus:** Anpassung der Webcam an die Objektentfernung

**FocusMode:** manuell oder automatisch

**FrameRate:** Bilder pro Sekunde

**Gain:** Helligkeitsverstärkung

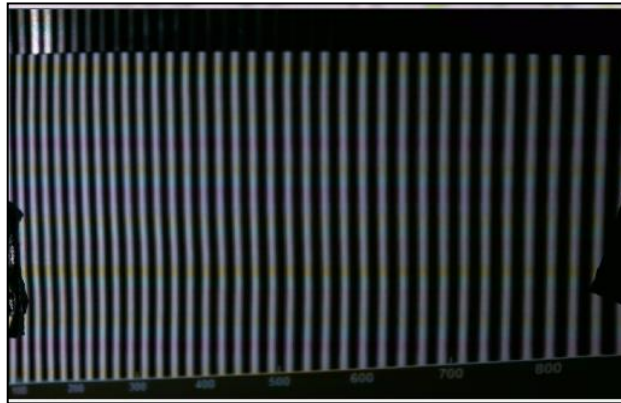
**Sharpness:** regelt die Schärfe des Streifenbildes

**WhiteBalance:** Weißabgleich

**WhiteBalanceMode:** manuell oder automatisch

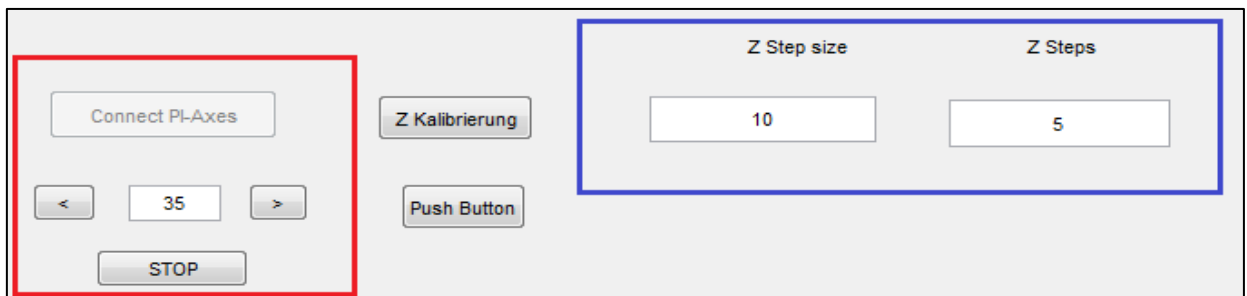
*Abbildung 23: Einstellungsparameter der Kamera in Grundeinstellung*

Das Livebild-Fenster (s. *Abbildung 24*) bietet dem Benutzer die Möglichkeit den Vorgang einer Messung „live“ zu verfolgen.



**Abbildung 24: Livebild-Fenster**

Die **Parameter zur Steuerung der Webcam** lassen sich in zwei Bereiche gliedern (s. *Abbildung 25*):



**Abbildung 25: Steuerung des Lineartischs (rot) und Parameter für Kalibrierung (blau)**

**Roter Bereich:** Steuerung des Lineartischs

- „**Connect PI-Axes-Button**“: aktiviert den Lineartisch
- **< [ ] >**: bewegt den Lineartisch um einen ausgewählten Wert in Millimetern

**Blauer Bereich:** Parameter für die metrische Kalibrierung

- „**Z Step size**“: Schrittgröße in Millimetern
- „**Z Steps**“: Anzahl Bilder (funktioniert nur mit ungeraden Zahlen  $\geq 3$ )

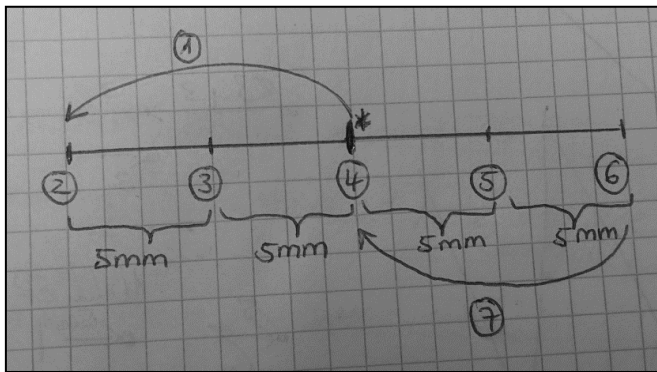
Im Folgenden wurde ein **Beispiel zur Kalibrierung im Detail anhand von Werten** durchgeführt:

- “Z Steps” = 5 Bilder
- “Z Step size” = 5 mm

$$\text{Tischauslenkung} = \frac{(Z \text{ steps} - 1)}{2} \times Z \text{ Step size} \quad (6.1)$$

Daraus ergibt sich mit der *Gleichung 6.1* folgende Tischauslenkung:

$$\text{Tischauslenkung} = [(5-1)/2] \times 5 = 10 \text{ mm}$$



\* = Startposition des motorischen Lineartischs

1 = motorischer Lineartisch fährt 10 mm nach links

2 = Aufnahme 1. Bild

3 = Aufnahme 2. Bild

4 = Aufnahme 3. Bild

5 = Aufnahme 4. Bild

6 = Aufnahme 5. Bild

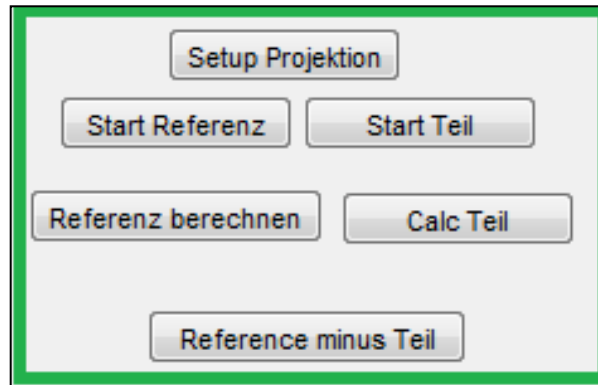
7 = motorischer Lineartisch fährt 10 mm nach rechts

**Abbildung 26: Fahrweg des motorischen Lineartischs**

In *Abbildung 26* ist der Fahrweg des motorischen Lineartischs während der Kalibrierung skizziert.

Der motorische Lineartisch (s. *Abbildung 19*) fährt von der Startposition (\*) 10 mm nach links in Richtung Kamera (1). Aus dieser Position (2) wird das erste Bild aufgenommen. Danach fährt der Tisch 5 mm nach rechts (also von der Kamera weg) und macht dort das nächste Bild (3). Es werden danach noch 3 weitere Bilder, jeweils im Abstand von 5 mm, aufgenommen. Von Position 6, an der das letzte Bild aufgenommen wird, fährt der motorische Lineartisch erneut die 10 mm vor (Richtung Kamera) und befindet sich dann wieder an seiner ursprünglichen Startposition (\*).

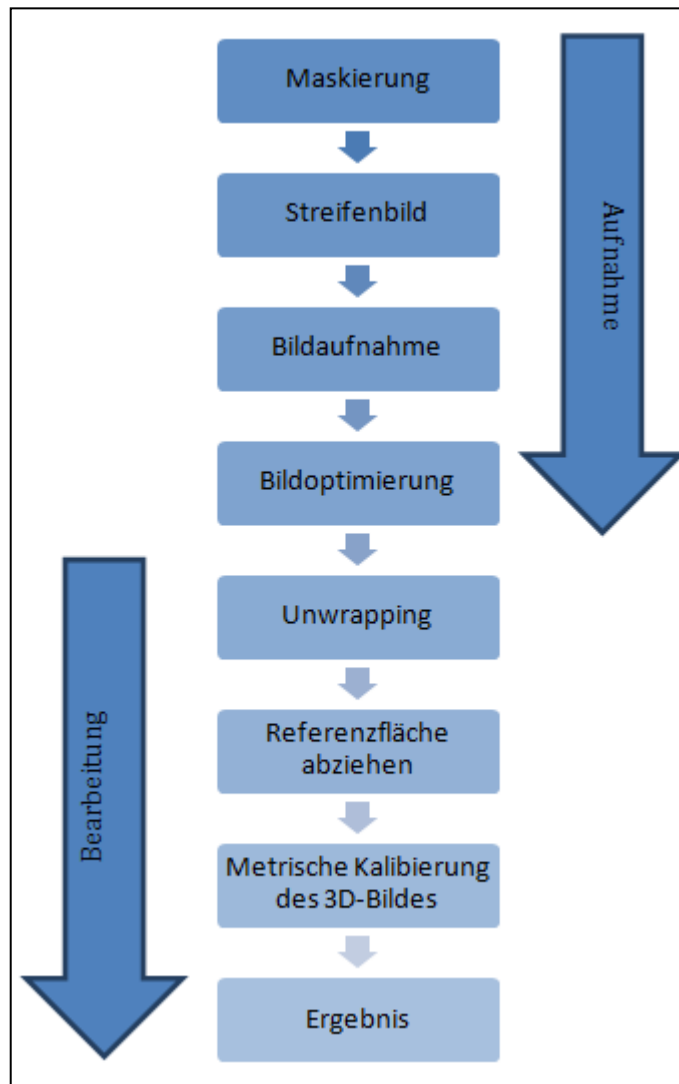
In *Abbildung 27* ist das **Steuerzentrum der Streifenprojektion** dargestellt, das für die Referenz- und Objektbildaufnahme zuständig ist. Darüber hinaus ist hier noch die Funktion, die das Objektbild vom Referenzbild abzieht, verankert. Der Button „Reference minus Teil“ verrechnet die Kalibrierdaten mit der Referenz und der Objektfläche und zieht diese voneinander ab. Nähere Informationen befinden sich in *Punkt 6.4.4* und in *Punkt 6.4.5*.



**Abbildung 27: Steuerzentrum der Streifenprojektion**

### 6.3 Funktionsprinzip

Das von Studenten aufgebaute Streifenprojektionsgerät arbeitet im Prinzip ähnlich wie ein kommerzielles Streifenprojektionsgerät: Ein sinusförmiges Streifenmuster wird vom Projektor auf das Messobjekt projiziert, von der Kamera erfasst und anschließend ausgewertet. In *Abbildung 28* wird der Programmablauf des selbstentwickelten Streifenprojektionsgerätes schematisch dargestellt.



*Abbildung 28: Schematischer Programmablauf der Streifenprojektion [25]*

### 6.3.1 Bildaufnahme

Die Farbdispersion stellt bei dem selbstentwickelten Streifenprojektionsgerät ein Problem dar.

Zur Behebung dieses Problems wurde nur der blaue Farbkanal der Webcam nutzbar gemacht, während der rote und grüne Farbkanal ausgeschaltet wurden, um die Dispersion so gering wie möglich zu halten.

Das Streifenbild wird mit folgender Gleichung erstellt:

$$I_{str} = (1 + \cos(2\pi * t - ph)) * \max.Helligkeit \quad (6.1)$$

Dieses läuft viermal, jeweils um die Phase  $\pi/2$  verschoben, über das Messobjekt (Phase-Shift Verfahren). Die Grauwerte wurden bei dem selbstentwickelten Gerät durch schwarze und weiße Pixel ersetzt. Dies trägt zur Minimierung der Wellen im resultierenden Bild bei. Unter Wellen werden vereinfacht wellige Überlagerungen im Bild verstanden. [25]

### 6.3.2 Bildauswertung

Das unbearbeitete Bild wird zunächst in Mosaikbausteine aufgeteilt um die Fortpflanzung fehlerhafter Pixel zu vermeiden. Anschließend wird für jeden Baustein der Prozess des „Unwrappings“ (s. *Abbildung 29*) durchgeführt.

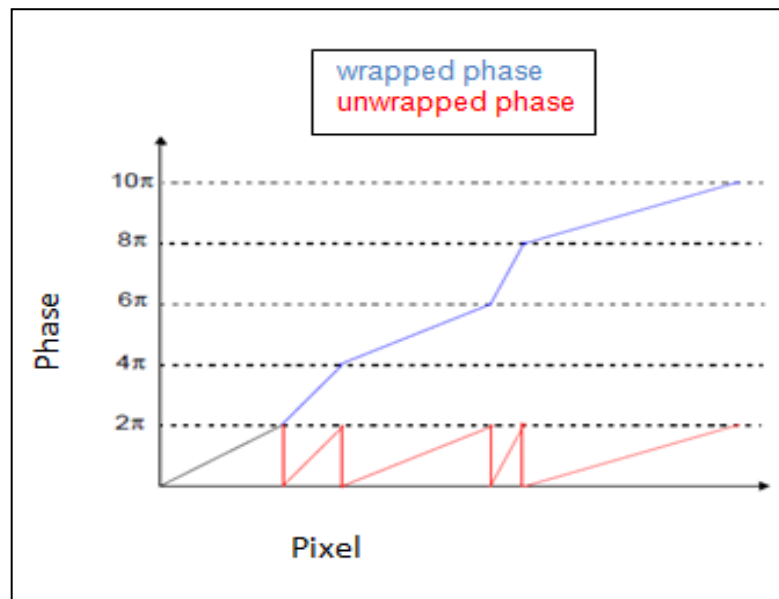
Die direkten Nachbarn der Mosaikbausteine unterscheiden sich außerdem in den Kantenhöhen, weshalb sie mit den jeweiligen benachbarten Mosaikfeldern durch einen Algorithmus angeglichen werden, um ein kontinuierliches Phasenfeld zu generieren.

Vom Zentrum ausgehend wird das unkorrigierte Bild spiralförmig bearbeitet. Dabei werden für jeden Mosaikbaustein die Kanten angeglichen und gespeichert um ein mehrfaches Überprüfen zu vermeiden.



Wie in *Punkt 5.3.3* bereits erwähnt wurde, weist das Phase-Shift Verfahren einen entscheidenden Nachteil auf. Dieser besteht in der Entstehung von Phasensprüngen bei Kanten oder Stufen im Objekt. Sind die Sprünge größer als  $\pi$  können diese nicht eindeutig erkannt werden. Deshalb wird bei der Bildauswertung der Prozess des „Phase Unwrappings“ verwendet (s. *Abbildung 29*).

Unter Phase Unwrapping versteht man einen Prozess, der  $2\pi$  Diskontinuitäten durch Hinzufügen von ganzzahligen Vielfachen entfernt, um einen kontinuierlichen Phasenverlauf zu erhalten. Dadurch wird eine glatte Oberfläche generiert und die Phase nutzbar gemacht. Die gemessene Phase wird normalerweise zwischen  $-\pi$  und  $+\pi$  „gewrapped“. [26]



**Abbildung 29: Phase Unwrapping**

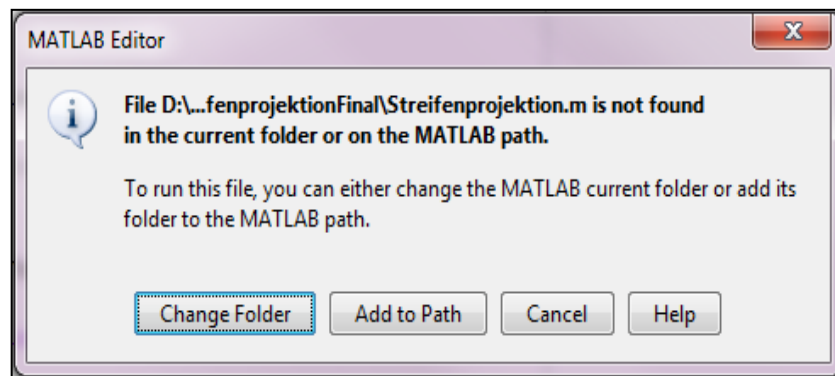
## 6.4 Bedienungsanleitung

### 6.4.1 Vorbereitung des Messsystems

Um mit dem Streifenprojektionsgerät eine Messung vorzunehmen muss zunächst die **Referenz-/Kalibrierplatte** (s. *Abbildung 20*) auf dem Mikrostelltisch (s. *Abbildung 19*) angebracht werden. Anschließend wird **Matlab** auf dem PC als Administrator ausgeführt und der Projektor (s. *Abbildung 17*) des Streifenprojektionsgeräts manuell eingeschaltet.

Nach dem Öffnen von Matlab wird zunächst der Reiter „Streifenprojektion.m“ ausgewählt und anschließend der Icon mit grünem Pfeil „**Run**“ im Programm gedrückt.

Daraufhin erscheint ein Fenster, indem der Button „**Change Folder**“ gedrückt wird.



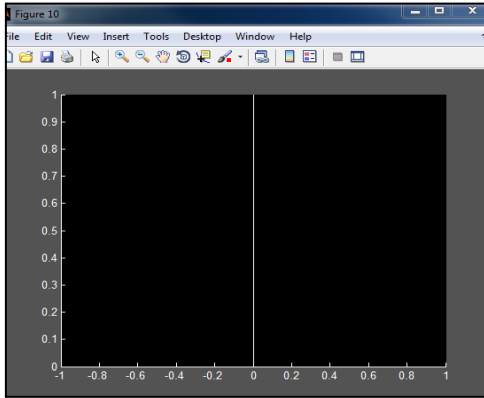
*Abbildung 30: Auswahl des "Change Folder" Buttons*

Nach der Betätigung des Buttons „Change Folder“ öffnet sich die GUI des Streifenprojektionsaufbaus (s. *Abbildung 22*) und die nötigen Voreinstellungen für eine Messung können im nächsten Schritt vorgenommen werden.

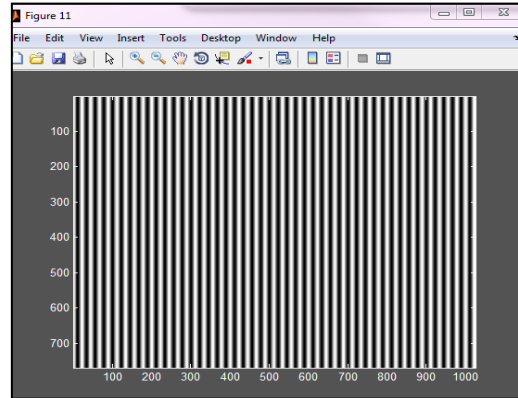
## 6.4.2 Voreinstellung Messung

Zur Voreinstellung der Messung gehört zum Ersten, das **Erzeugen eines Streifenmusters**, durch den Button „**Streifenwurf**“.

Dieser erzeugt zwei Bilder: „Figure 10“ (s. *Abbildung 32*) und „Figure 11“ (s. *Abbildung 31*).

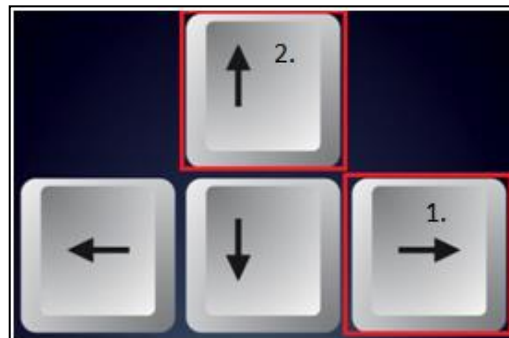


**Abbildung 32: Oter Streifen in "Figure 10"**



**Abbildung 31: Streifenmuster in "Figure 11"**

Um diese beiden Bilder im „Livebild-Fenster“ erscheinen zu lassen, muss jedes der beiden „Figure“ einzeln ausgewählt werden. Nun wird nacheinander (für jedes „Figure“) die **Windows-Taste** auf der Computertastatur gedrückt gehalten, während **2x die rechte Pfeiltaste (1.)** und **1x die obere Pfeiltaste (2.)** betätigt wird.



**Abbildung 33: Pfeiltasten**

Zum Zweiten muss nun das Streifenbild hinsichtlich Belichtung, Fokus und Weißabgleich optimal über die GUI eingestellt werden. Dazu bietet sich als Erstbenutzer die aktualisierte Auswahl **Grundeinstellung** an. Anhand „Figure 11“ (s. *Abbildung 31*) ist die Grundeinstellung des Streifenbildes vorzunehmen. Die optimale Einstellung ist in *Abbildung 34* dargestellt. Es sollte darauf geachtet werden, dass der „Exposure-Reiter“ so hoch wie möglich eingestellt wird, ohne dass das sichtbare Streifenbild überbelichtet wird. Dagegen sollte der „Gain-Reiter“ so niedrig wie möglich geregelt werden (s. Belichtungsbeispiele des sichtbaren Streifenbildes).

## Grundeinstellungen im Überblick:

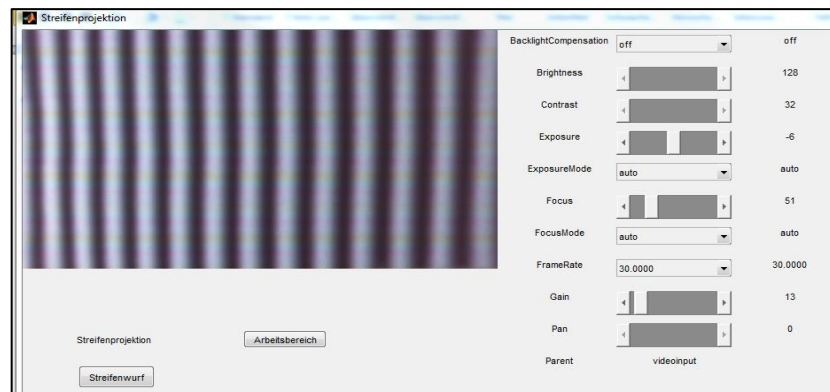
- **BacklightCompensation:** off
- **ExposureMode:** Manual
- **Exposure:** so hoch wie möglich (ca. -6)
- **Focus:** sichtbares Streifenbild sollte scharf abgebildet werden.
- **FocusMode:** Manual
- **FrameRate:** kann beliebig eingestellt werden
- **Gain:** so niedrig wie möglich (ca. 0)
- **Sharpness:** sichtbares Streifenbild sollte scharf abgebildet werden.
- **WhiteBalance:** so einzustellen, dass das sichtbare Streifenbild keinen Weißstich hat (ca. 5295)
- **WhiteBalanceMode:** Manual

BacklightCompensation	<input type="text" value="off"/>	off	Saturation	<input type="range" value="32"/>	32
Brightness	<input type="range" value="128"/>	128	Selected	<input type="text" value="off"/>	off
Contrast	<input type="range" value="32"/>	32	Sharpness	<input type="range" value="22"/>	22
Exposure	<input type="range" value="-6"/>	-6	SourceName	string	
ExposureMode	<input type="text" value="manual"/>	manual	Tag	string	
Focus	<input type="range" value="102"/>	102	Tilt	<input type="range" value="0"/>	0
FocusMode	<input type="text" value="manual"/>	manual	Type	string	videosource
FrameRate	<input type="text" value="30.0000"/>	30.0000	WhiteBalance	<input type="range" value="5295"/>	5295
Gain	<input type="range" value="0"/>	0	WhiteBalanceMode	<input type="text" value="manual"/>	manual
Pan	<input type="range" value="0"/>	0	Zoom	<input type="range" value="1"/>	1
Parent	videoinput				

Abbildung 34: Optimale Einstellung der Kameraparameter

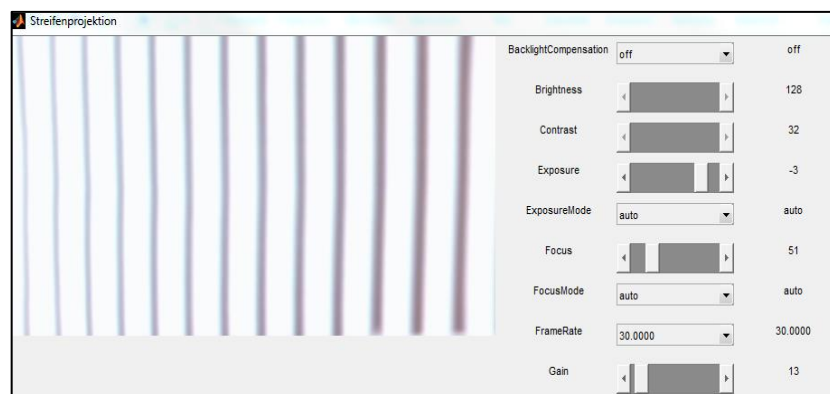
## Belichtungsbeispiele des sichtbaren Streifenbilds

### Beispiel 1: Optimal belichtetes Streifenbild



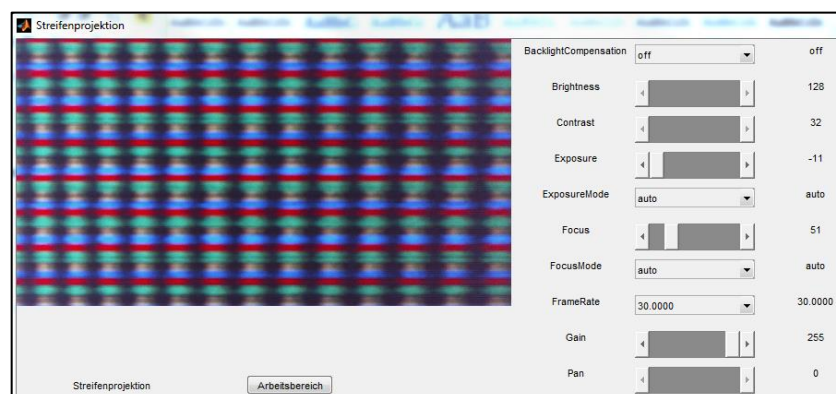
**Abbildung 35: Optimal belichtetes Streifenbild**

### Beispiel 2: Überbelichtetes Streifenbild



**Abbildung 36: Überbelichtetes Streifenbild**

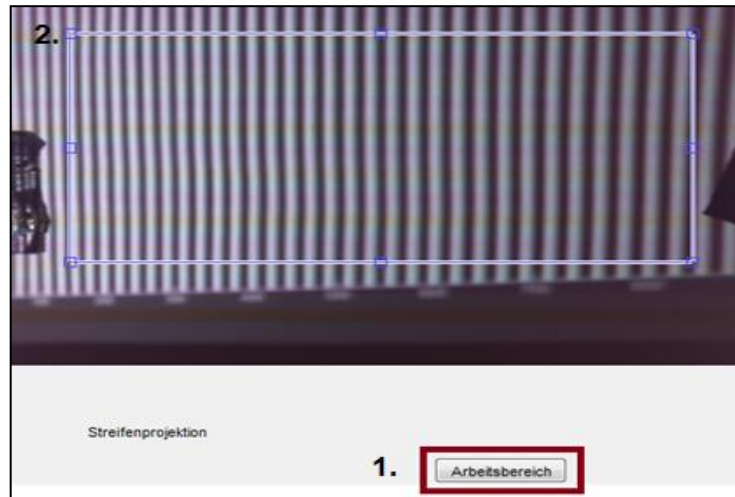
### Beispiel 3: Unterbelichtetes Streifenbild



**Abbildung 37: Unterbelichtetes Streifenbild**

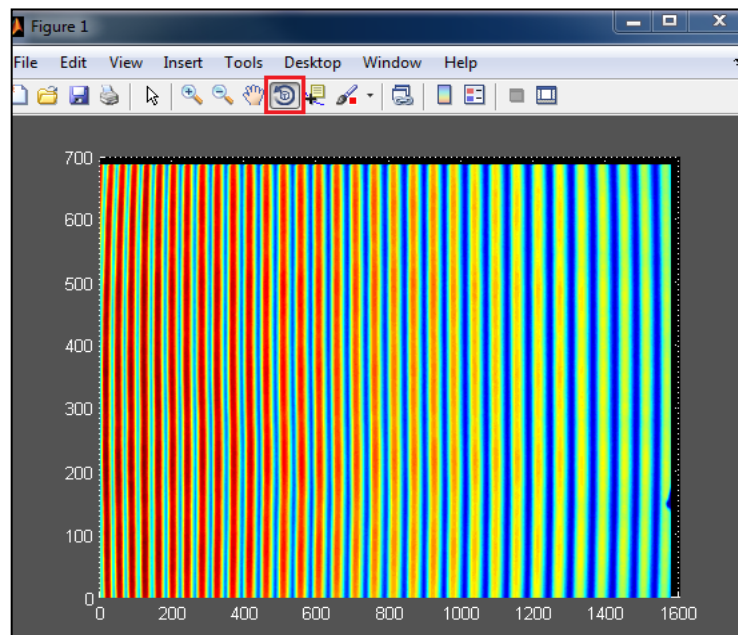
### 6.4.3 Kalibrierung des Streifenprojektionsgeräts

Bevor das Kalibrieren gestartet wird, besteht nochmals die Gelegenheit zu überprüfen, ob das Streifenbild richtig belichtet wird, also zuvor die richtigen Belichtungseinstellungen in der GUI vorgenommen wurden. Dafür wird als Erstes der Button „**Arbeitsbereich**“ gedrückt und als Zweites wird **die gewünschte Größe des Arbeitsbereiches** ausgewählt (s. *Abbildung 38*).



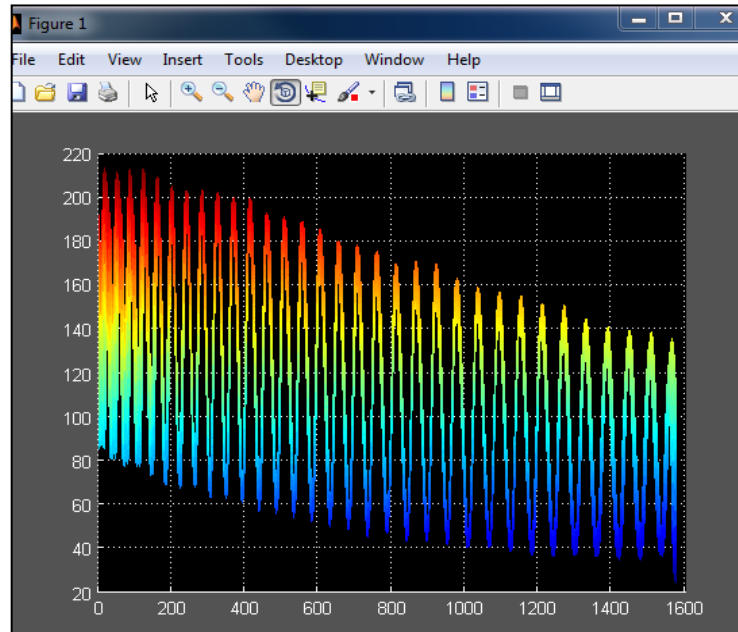
**Abbildung 38: Auswahl Arbeitsbereich**

Durch einen **Doppelklick** auf den zuvor gezogenen Rahmen (2.) öffnet sich „Figure 1“, in welchem der ausgewählte Arbeitsbereich in Pixeln dargestellt wird.



**Abbildung 39: Ausgewählter Arbeitsbereich in X-Y-Richtung**

Im nächsten Schritt wird der Knopf, der in *Abbildung 39* rot umrandet dargestellt ist, gedrückt. Mit der rechten Maustaste wird in das Bild geklickt und die **X-Z-View** ausgewählt. Daraufhin öffnet sich die *Abbildung 40*.



**Abbildung 40: Ausgewählter Arbeitsbereich in X-Z-Richtung**

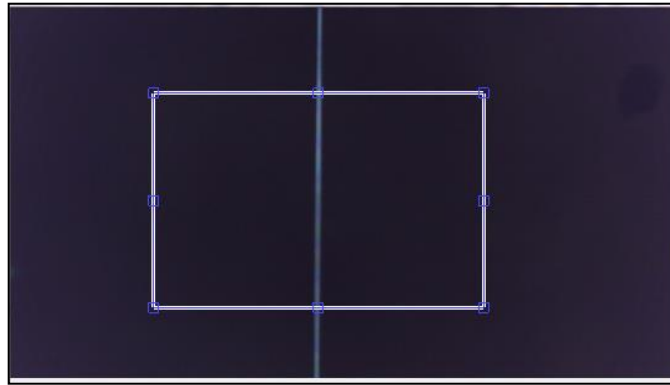
Ist die Pixelangabe in z-Richtung größer als der Wert 255, so ist das Bild überbelichtet. Alles unter diesem Wert spricht für ein gut ausgeleuchtetes Bild. Bei Überbelichtung muss die Belichtung über die Einstellung der Kameraparameter (s. *Abbildung 34*) geändert werden.

Um mit dem Kalibrieren beginnen zu können, muss zuallererst ein Kalibrierbereich festgelegt werden. Dafür ist die **Auswahl von „Figure 10“** (s. *Abbildung 32*) erforderlich.

Als nächstes muss die Größe einer Fläche, die kalibriert werden soll, aufgespannt werden. Hierfür ist das gleiche Vorgehen wie im obigen Schritt notwendig:

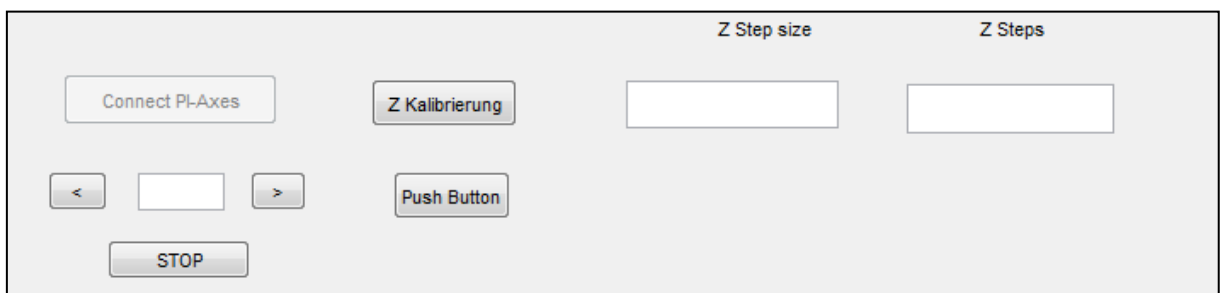
- Button „**Arbeitsbereich**“ drücken
- **gewünschte Größe des Arbeitsbereiches** auswählen

Wichtig ist, dass der Streifen, wie in *Abbildung 41*, in der Mitte des ausgewählten Arbeitsbereiches liegt.



**Abbildung 41: Richtige Positionierung des Arbeitsbereiches in „Figure 10“**

Im nächsten Schritt wird der „**Connect PI-Axes**“ Button (s. *Abbildung 42*) ausgewählt, der den motorischen Lineartisch aktiviert. Wichtig ist, dass der Streifen in *Abbildung 41* bei Verschiebung des Lineartisches innerhalb des Arbeitsbereiches bleibt.

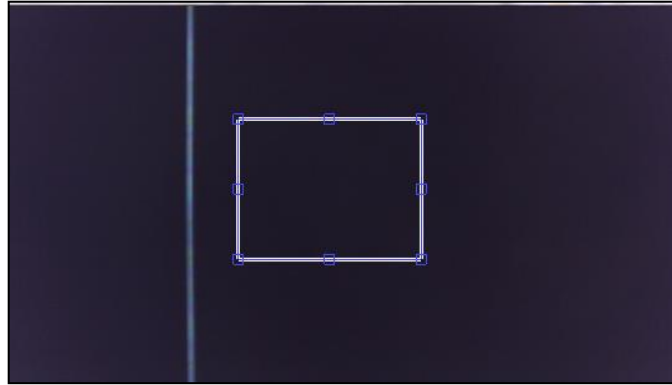


**Abbildung 42: Parameter der Kalibrierungseinstellung**

Um zu überprüfen welche Werte „**Z Step size**“ und „**Z Steps**“ (s. *Abbildung 42*) annehmen dürfen, wird zunächst eine beliebige Zahl in das Kästchen unter dem „Connect PI-Axes“ Button eingetragen. Der Ausgangspunkt ist immer der Streifen in der Mitte des Arbeitsbereiches (s. *Abbildung 41*).

Als Erstes wird der **linke Pfeil** < (unterhalb des „Connect PI-Axes Button) gedrückt, bis sich der Streifen gerade noch innerhalb des Arbeitsbereiches befindet. Ist der Streifen außerhalb des Arbeitsbereiches (s. *Abbildung 43*) muss dies durch den **rechten Pfeil** > korrigiert werden.





**Abbildung 43: Streifen außerhalb des Arbeitsbereiches**

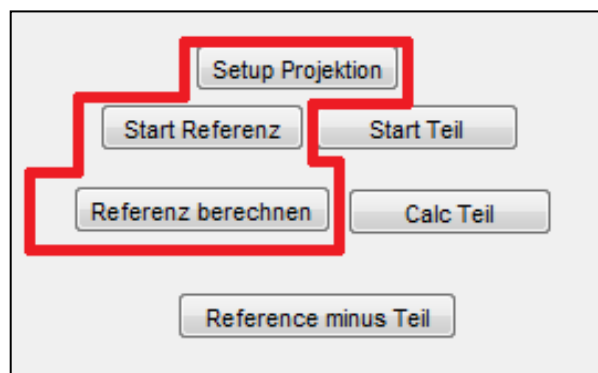
Als Zweites wird dieser **Wert verdoppelt** (links und rechts des mittleren Streifens) und zusätzlich **um eins erhöht** (Mitte des Arbeitsbereiches). Der erhaltene Wert wird schließlich in das Kästchen „Z steps“ eingetragen. Desweiteren kann die Zahl die unter dem „ConnectPI-Axes“ Button zu Beginn eingetragen wurde, für „Z Step size“ übernommen werden. Danach bestätigt der **Doppelklick auf den Rahmen** den Arbeitsbereich.

Abschließend wird „**Z Kalibrierung**“ (s. *Abbildung 42*) gedrückt und die metrische Kalibrierung beginnt. Dieser Vorgang kann einige Minuten in Anspruch nehmen.

#### 6.4.4 Referenzbild generieren

Um ein Referenzbild zu erzeugen müssen die folgenden Schritte ausgeführt werden:

1. „**Setup Projektion**“ drücken
2. „**Start Referenz**“ drücken sobald auf der Programmieroberfläche Matlab im „Command Window“, *‘fertig’* angezeigt wird
3. „Referenz berechnen“ auswählen



**Abbildung 44: Buttons zur Erzeugung eines Referenzbildes**

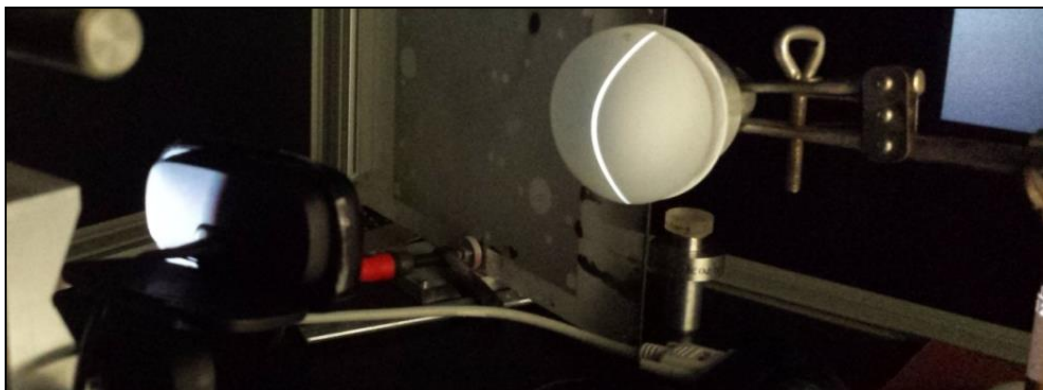
Der 3. Schritt muss nicht zwingend ausgeführt werden, da dessen Funktion im Button **„Reference minus Teil“** enthalten ist. Nur wenn die Referenzfläche als txt-Datei ausgegeben werden soll, wird dieser ausgeführt. Matlab speichert die txt-Datei unter dem Namen **„BildzuMesswertefile3.txt“**. Damit besteht die Möglichkeit, das Referenzbild später in ZAPHOD (s. *Punkt 7.2*) zu laden und auszuwerten. Bevor fortgefahren wird, ist es **wichtig, die txt-Datei umzubenennen!**

#### 6.4.5 Objektoberfläche messen

Um ein Objekt auszumessen, wird die Kalibrierplatte entfernt und durch das **Messobjekt** ersetzt. Hierbei ist wichtig, matte Objekte auszuwählen. Das Vermessen transparenter oder zu stark reflektierender Objekte ist für die Streifenprojektion ungeeignet. Sollen diese Objekte dennoch gemessen werden, müssen diese vorab mit einem Entspiegelungsspray bearbeitet werden.

Außerdem ist darauf zu achten, dass das **Objekt parallel und ohne Verkippung zur Webcam** ausgerichtet (s. *Abbildung 45*) wird.

Zur richtigen Positionierung des Messobjekts wird **„Figure 10“** (s. *Abbildung 32*) ausgewählt. Der Streifen sollte sich, wie in *Abbildung 45*, in der **Mitte des Messobjektes** befinden, um ein möglichst genaues Messergebnis zu erhalten.

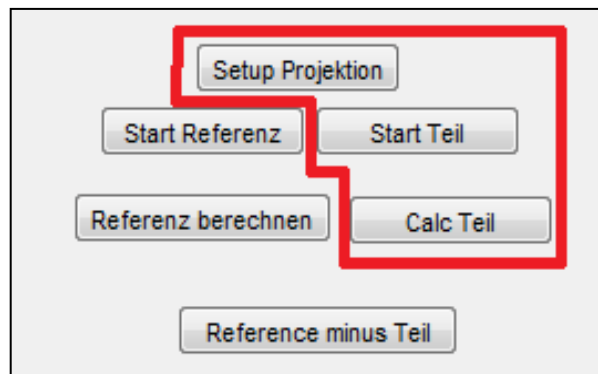


*Abbildung 45: Optimale Ausrichtung des Messobjekts zur Kamera*

Anschließend wird **„Figure 11“** (s. *Abbildung 31*) ausgewählt und die Belichtung des Objekts überprüft. Bei diesem Schritt sollte nur noch die **„Exposure“** (s. *Abbildung 34*) verändert werden.

Um ein Objekt auszumessen, muss zunächst ein Ausschnitt, der gemessen werden soll, ausgewählt werden. Dafür wird (wie beim Kalibriervorgang) der „**Arbeitsbereich**“ Button gedrückt, der gewünschte **Rahmen gezogen** und durch **Doppelklick** bestätigt. Anschließend werden folgende Schritte ausgeführt (s. *Abbildung 46*):

1. „**Setup Projektion**“ drücken
2. „**Start Teil**“ drücken sobald auf der Programmieroberfläche Matlab im „Command Window“, 'fertig' angezeigt wird
3. „**Calc Teil-Button**“ auswählen.

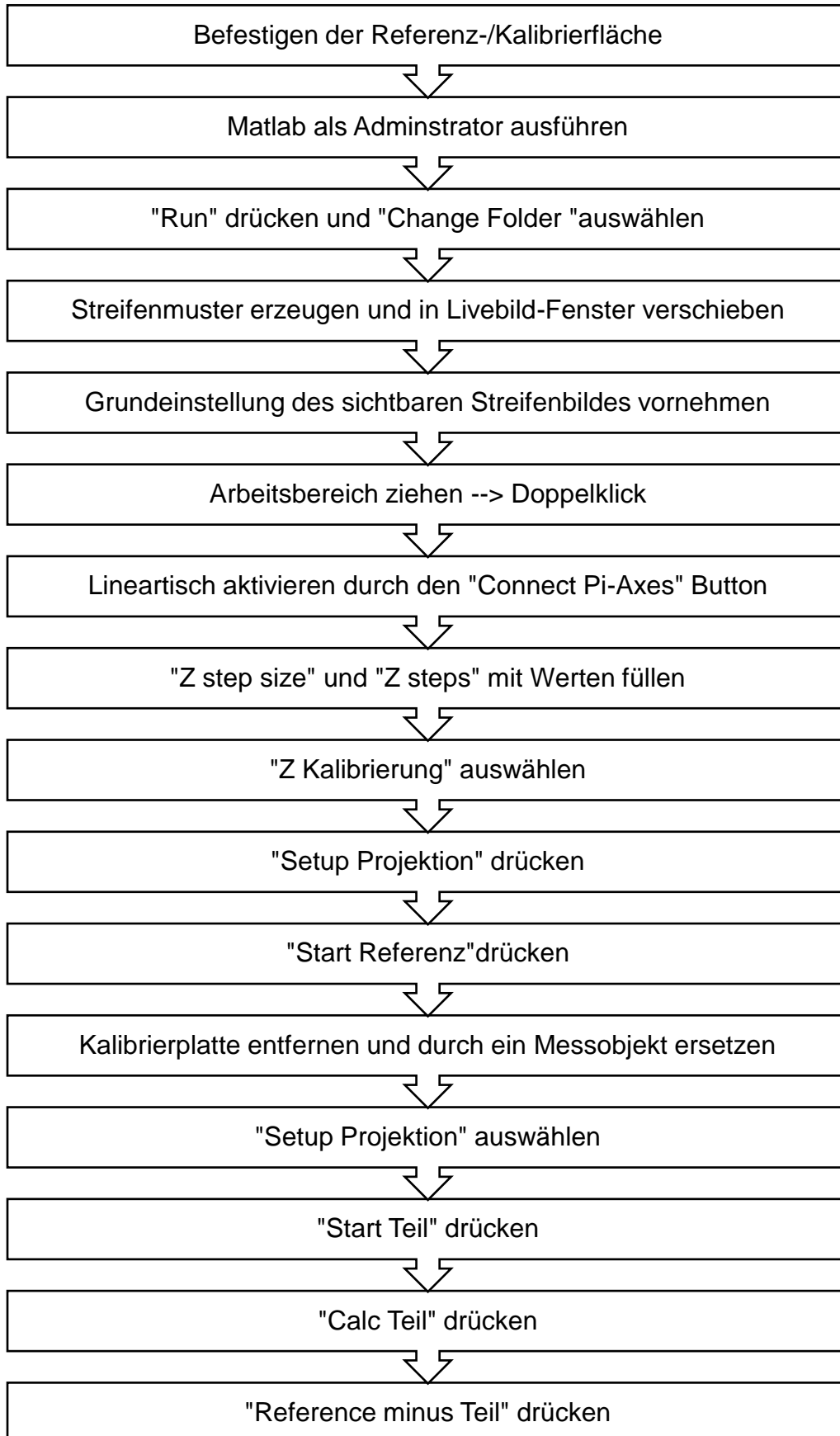


*Abbildung 46: Buttons zur Erzeugung eines Objektbildes*

Der Button „**Reference minus Teil**“ enthält bereits den 3. Schritt, weshalb dieser nicht unbedingt ausgeführt werden muss. Soll die Objektfläche als txt-Datei ausgegeben werden ist es jedoch notwendig diesen zu betätigen. Die txt-Datei wird von Matlab unter dem Namen „**BildzuMesswertefile3.txt**“ gespeichert und muss vor dem Fortfahren **umbenannt** werden.

Anschließend muss man noch den Button „**Reference minus Teil**“ (s. *Abbildung 46*) drücken und man erhält eine endgültige Objektfläche, die wieder als txt-Datei gespeichert wird.

#### 6.4.6 Checkliste



## **6.5 Programmverbesserungen**

### **6.5.1 Auswahl zwischen Grund- und erweiterter Einstellung**

Die GUI wurde dahingehend verändert, dass bei der Einstellung der Kameraparameter zwischen Grundeinstellung und erweiterter Einstellung ausgewählt werden kann. Die Grundeinstellung bietet sich für den Erstbenutzer an. Die erweiterte Einstellung ist für den erfahrenen Bediener gedacht.

Im Grundeinstellungsmodus lassen sich nur die Regler „Exposure“, „Gain“, „Focus“, „sharpness“ und „WhiteBalance“ einstellen. Die restlichen Parameter werden ausgeblendet.

### **6.5.2 Speicherung der Messdaten als Textdatei**

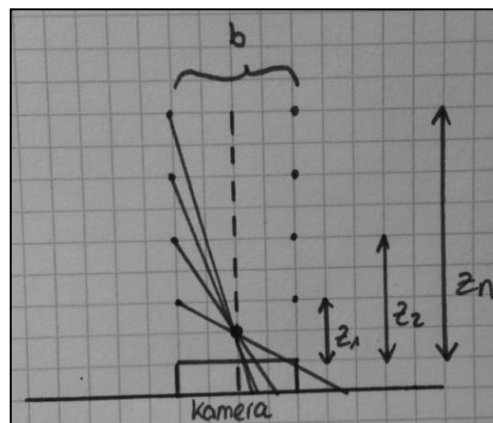
Bisher bestand nicht die Möglichkeit, die aufgenommenen und von Matlab verarbeiteten Bilder in geeigneter Weise zu speichern um diese auszuwerten.

Das wurde geändert indem die Bilder nun in einer Textdatei gespeichert und von Matlab ausgegeben werden. Damit besteht fortan die Option die Messergebnisse, mit Hilfe eines geeigneten Auswerteprogramms, analysieren und vergleichen zu können.

### 6.5.2 x-y Kalibrierung

Bevor mit den eigentlichen Messungen angefangen werden konnte, wurde ein Probeobjekt ausgemessen und die von Matlab generierte txt-Datei in Zaphod eingelesen. Es zeigte sich ein sehr großer RMS- und PV-Wert, der schon im Meterbereich lag, was auf einen Fehler in der Kalibrierung schließen ließ. Das Problem hierbei ist, dass Zaphod die Messdaten in der grafischen Oberfläche in Millimeter anzeigt, wohingegen die Kalibrierung des Streifenprojektionsgeräts in x- und y- Richtung in Pixeln erfolgt. Es bestand nun die Aufgabe, den Pixelabstand in metrische Daten umzurechnen. Im Folgenden wurden einige Vorüberlegungen zur Problembewegung angefertigt, die dann in Matlab programmiert wurden.

Die **erste Vorüberlegung** bestand darin, dass der Wert von  $b$  gleich bleiben muss, auch wenn man den Lineartisch weiter von der Kamera entfernt (s. *Abbildung 47*).

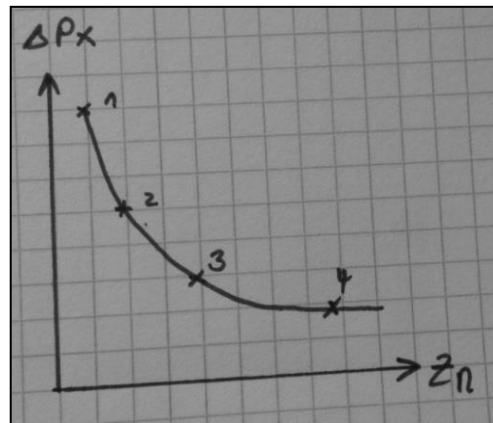


**b:** gemessener Abstand zwischen zwei festen Punkten  
 **$z_1 - z_n$ :** Abstände des Lineartischs von der Kamera

**Abbildung 47:  $b$  in Abhängigkeit von  $z_n$**

Die *Abbildung 48* zeigt jedoch, dass das Gegenteil passiert. In diesem Fall wird nämlich der Pixelabstand, damit also auch  $b$ , bei der weit entferntesten  $z$ -Position (4) für die Kamera kleiner. Deshalb war die Überlegung durch einen geeigneten Streckungsfaktor, den gemessenen Abstand zwischen zwei Punkten ( $b$ ) für die Kamera als gleich groß erscheinen zu lassen.

Diese Vorüberlegung war nur eine Ausgangsidee und wurde im Folgenden weiterentwickelt.



1: entspricht Position  $z_1$   
4: entspricht der letzten  $z$ -Position

Abbildung 48: Grafische Darstellung -  $b$  in Abhängigkeit von  $z_n$

Die **zweite Vorüberlegung** bestand zunächst darin eine lineare Regression für jedes Pixel zu bestimmen. Danach besteht die Möglichkeit, immer wieder die aktuelle  $z$ -Position bestimmen zu können.

Wie in *Abbildung 49* zu sehen ist, werden drei Bilder (W-Bilder) an unterschiedlichen  $z$ -Positionen aufgenommen.

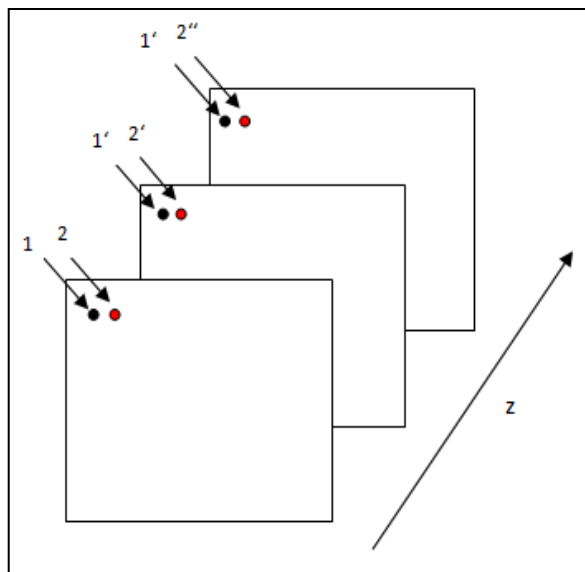


Abbildung 49: Beispiel für drei Bilder an unterschiedlichen  $z$ -Positionen

Für jeweils das erste Pixel der drei W-Bilder gilt:

$$Z(1) = a_0 W^0(1,1) + a_1 W^1(1,1) + a_2 W^2(1,1)$$

$$Z(1) = a_0 W^0(1',1) + a_1 W^1(1',1) + a_2 W^2(1',1)$$

$$Z(1) = a_0 W^0(1'',1) + a_1 W^1(1'',1) + a_2 W^2(1'',1)$$

Für das zweite Pixel der drei W-Bilder gilt:

$$Z(2) = a_0 W^0(2,2) + a_1 W^1(2,2) + a_2 W^2(2,2)$$

$$Z(2) = a_0 W^0(2',2) + a_1 W^1(2',2) + a_2 W^2(2',2)$$

$$Z(2) = a_0 W^0(2'',2) + a_1 W^1(2'',2) + a_2 W^2(2'',2)$$

Für das k-te Pixel gilt dementsprechend:

$$Z(k) = a_0 W^0(k,k) + a_1 W^1(k,k) + a_2 W^2(k,k)$$

$$Z(1) = a_0 W^0(k',k) + a_1 W^1(k',k) + a_2 W^2(k',k)$$

$$Z(1) = a_0 W^0(k'',k) + a_1 W^1(k'',k) + a_2 W^2(k'',k)$$

Zum Schluss kann eine Ausgleichsrechnung durchgeführt werden, die wie folgt aussieht:

$$\bar{a} = (\bar{\bar{W}} * \bar{\bar{W}}')^{-1} \times \bar{z}_{ges} \quad (6.2)$$

Mit:

$$\bar{a} = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad ; \quad \bar{z}_{ges} = \text{variierende z-Positionen in Vektorschreibweise}$$



Die **vereinfachte Umsetzung in Matlab zur Bestimmung der Koeffizienten** wird im Folgenden erläutert:

Der Matlab-Quellcode befindet sich im Anhang der Bachelorarbeit (s. *Anhang A*).

Beispiel: Anzahl Bilder = 3  
Potenzen(p) = 3

Alle Pixel, die nicht NaN<sup>1</sup> sind werden im W-Bild<sup>2</sup> gefunden und als Wok<sup>3</sup> gespeichert.



Es wird eine leere 3D Matrix generiert, mit der Höhe von Wok. Die Anzahl der Potenzen bestimmt die Breite der Matrix und die Tiefe ist durch die aufgenommenen Bilder definiert.



Die drei leeren Spalten der Matrix werden jeweils mit den Pixelwerten, an den Stellen wo das Bild keine NaNs hat (Wok), befüllt. (**A**)  
Dieser Schritt wird für jedes der 3 aufgenommenen Bilder ausgeführt.



Nun wird eine zweite, 2D-Matrix erzeugt, die in y Richtung die Länge von Wok hat und drei Spalten breit ist. In die 1. Spalte wird die nullte, in der 2. Spalte die erste und in der 3. Spalte die zweite Potenz gespeichert. (**p**)



Anschließend erfolgt **A\*p** (s. *Abbildung 49*)  
Das heißt, jedes "korrekte" Pixel ( $x_m$ ), für jedes der drei aufgenommenen Bilder, wird mit den drei Potenzen multipliziert (s. *Abbildung 50*)  
Schließlich hat man die Form:  $z_n = a_0 x_m^0 + a_1 x_m^1 + a_2 x_m^2$  ( $n=1-3$ ,  $m=1$ -Pixel -  $m$ -Pixel)



Nun wird jedes Pixel (von Pixel 1 bis Pixel Wok) wie folgt durchgearbeitet:

Für das 1. Pixel der drei versetzt aufgenommenen Bilder wird eine 3x3 Matrix generiert und mit der Gleichung  $(A^T A) / (A^T) * z_0 = x$  verrechnet.

Dieses Vorgehen wird für alle Wok Pixel durchgeführt um eine lineare Regression für jedes Pixel zu erhalten.

<sup>1</sup>NaN = not a number. Unter NaNs versteht man die Pixel, die nicht mehr als korrekten Pixel von der Kamera erfasst werden.

<sup>2</sup>W-Bild = von der Kamera erfasstes Qualitätsbild

<sup>3</sup>Wok = Pixelkoordinaten, die keine NaNs sind, des Qualitätsbildes

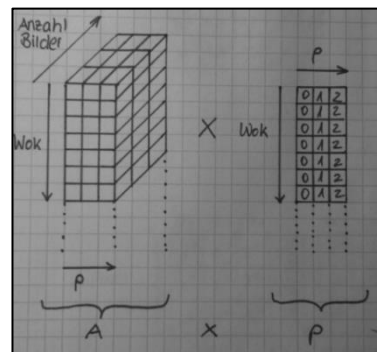


Abbildung 50:  $A \times p$

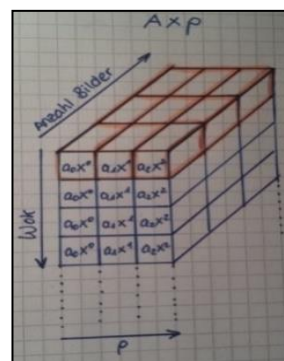


Abbildung 51: Beispiel für den ersten Pixel

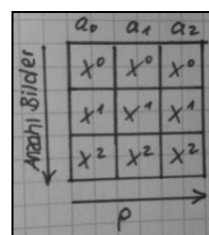


Abbildung 52: Matrix A

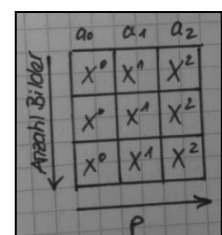


Abbildung 53: Transponierte Matrix  $A'$



**2. Position:**

$$z_{21} = a' \times \frac{i_1}{x_1} - a' i_0 \times \frac{1}{x_1} + z_0$$

$$\begin{matrix} \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \end{matrix}$$

$$z_{2m} = a' \times \frac{i_m}{x_m} - a' i_0 \times \frac{1}{x_m} + z_0$$

**3. Position:**

$$z_{31} = a' \times \frac{i_1}{x_1} - a' i_0 \times \frac{1}{x_1} + z_0$$

$$\begin{matrix} \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \end{matrix}$$

$$z_{3m} = a' \times \frac{i_m}{x_m} - a' i_0 \times \frac{1}{x_m} + z_0$$

Anschließend wird die nachführende Matrix gebildet und Ausgleichsrechnungen durchgeführt:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} z_{11} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ z_{nm} \end{pmatrix}}_{\bar{B}} = \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{i_1}{x_1} & \frac{-1}{x_1} & 1 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \frac{i_m}{x_m} & \frac{-1}{x_m} & 1 \end{pmatrix}}_{\bar{A}} \times \underbrace{\begin{pmatrix} a' \\ a' i_0 \\ z_0 \end{pmatrix}}_{\bar{x}}$$

$\bar{x}$  = Unbekannt

**Ausgleichsrechnung durchführen:**

$$1. \quad \bar{B} = \bar{A} \times \bar{x} \quad (6.7)$$

$$2. \quad \bar{A}^T \times \bar{B} = (\bar{A}^T \times \bar{A}) \times \bar{x} \quad (6.8)$$

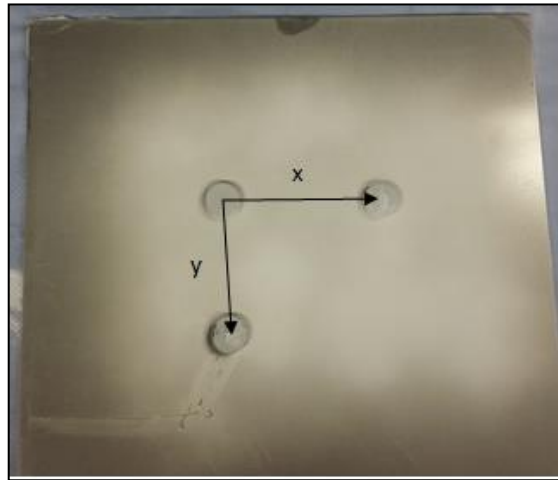
$$3. \quad (\bar{A}^T \times \bar{A})^{-1} \times \bar{A}^T \times \bar{B} = \bar{x} \quad (6.9)$$



- $\bar{B}$  und  $\bar{A}$  aus Messwerten bilden
- die transponierte Matrix  $\bar{A}^T$  aus  $\bar{A}$  bilden
- $(\bar{A}^T \times \bar{A})^{-1}$  berechnen (geht nur mit Matlab)
- Lösung für  $\bar{x}(a', a'i_0 \text{ und } z_0)$  berechnen

Durch das Einsetzen von  $\bar{x}$  in die Gleichung  $x(z) = \frac{a'i - a'i_0}{z - z_0}$  erhält man den gesuchten Pixelabstand.

Bevor mit der Programmierung des Pixelabstandes in metrische Daten angefangen werden kann, wird die Referenz-/Kalibrierplatte mit drei Magneten versehen (s. *Abbildung 54*).



**Abbildung 54: Referenz-/Kalibrierplatte zur Bestimmung des x-/y-Abstands in mm**

Es ist darauf zu achten, dass die Magnete einen rechten Winkel bilden. Nun wird der x- und der y-Abstand, der in *Abbildung 54* gekennzeichnet wurde, manuell mit einem Messschieber gemessen. Der gemessene Wert wird im Programm „x-calib.m“ an den in *Abbildung 55* roten gekennzeichneten Stellen eingetragen.

```
for i=1:anzahl_bilder
    x(:,:,i)=x(:,:,i)./(x(:,:,i).*((x-Wert)/M(1,i)));
    y(:,:,i)=y(:,:,i)./(y(:,:,i).*((y-Wert)/M(2,i)));
end

t1(:,1)=reshape(x,numel(x),1)
t1(:,2)=reshape(y,numel(y),1);

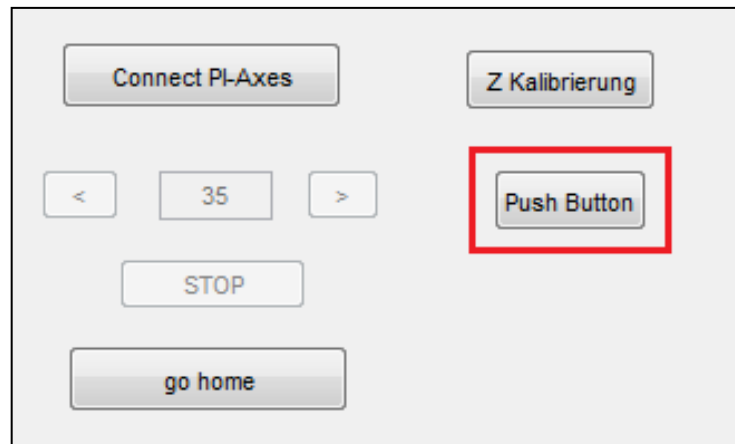
[y,x]=meshgrid(1:10:MM,1:10:NN,1:anzahl_bilder);

for i=1:anzahl_bilder
    x(:,:,i)=-1./((x(:,:,i).*((x-Wert)/M(1,i))));
    y(:,:,i)=-1./((y(:,:,i).*((y-Wert)/M(2,i))));
end
```

**Abbildung 55: Stellen im Matlab Quellcode, an denen die gemessenen x- und y-Werte eingetragen werden**

Das Programm „x-calib“ ist unter dem Reiter „Streifenprojektion.m“ zu finden. Um es zu öffnen, wird die Maus auf den Namen „x-calib.m“ bewegt, die rechte Maustaste gedrückt und **Open „x-calib.m“** ausgewählt.

Nachdem die gemessenen Werte eingetragen wurden, wird der „**Push Button**“ (s. *Abbildung 56*) betätigt und die x- und y-Kalibrierung in metrische Daten beginnt.



**Abbildung 56: "Push Button" zum Start der x-/y-Kalibrierung**

Durch einen Algorithmus der Kreise erkennt, wird der Pixelabstand der Magnete in x- und y-Richtung bestimmt.

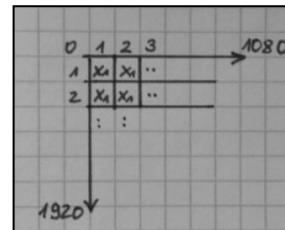
Die **Umsetzung in Matlab** wird anhand der **x-Kalibrierung** erläutert. Die nachfolgenden Schritte werden identisch für die y-Kalibrierung ausgeführt. Die Bildgröße, die die Webcam erfasst, beträgt **1920 x 1080** Pixel. Der Matlab-Quellcode zur Bestimmung der x- und y-Abstands in metrische Angaben befindet sich im Anhang der Bachelorarbeit (s. *Anhang A*).

Der gefundene Pixelabstand des Bildes in x-Richtung wird mit den gemessenen metrischen Daten in mm/Pixel umgewandelt. Dieser Vorgang erfolgt für jedes der aufgenommenen Bilder.

\* $x_1$  = Wert in mm/Pixel für das erste aufgenommene Bild

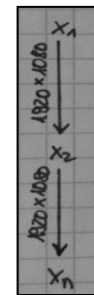
\*\* $x_n$  = Wert in mm/Pixel für das n-te aufgenommene Bild

Der Wert ( $x_1^*$ ) in mm/Pixel wird für das erste aufgenommene Bild auf einer Länge von 1920 und einer Breite von 1080 aufgetragen (s. *Abbildung 56*). Dieser Schritt wird ebenso für die restlichen aufgenommenen Bilder ( $x_n^{**}$ ) durchgeführt



**Abbildung 57: Beispiel für die Verteilung des  $x_1$ -Wertes**

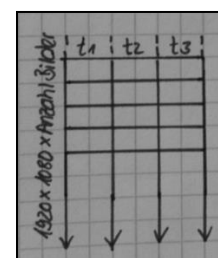
Definition der Variable  $t_1$ , die die Länge 1920x1080xAnzahl Bilder hat und die Werte  $x_1$ - $x_n$  enthält. Die  $x_1$ -Werte werden auf einer Länge von 1920x1080 aufgetragen. Darunter folgen die  $x_2$ -Werte auf einer Länge, die ebenfalls 1920x1080 entspricht (s. *Abbildung 57*).



**Abbildung 58: Schematische Darstellung von  $t_1$**

Definition der Variablen  $t_2$ , die der Variablen  $t_1$  gleicht, abgesehen davon, dass die  $x_n$ -Werte ein negatives Vorzeichen bekommen.

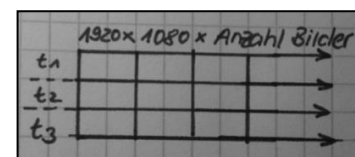
Definition der Variablen  $t_3$ , die der Länge von  $t_1$  und  $t_2$  gleicht, aber deren Werte 1 entsprechen.



**Abbildung 59: Schematische Darstellung der Variablen  $A$**

Definition der Variablen  $z$ , die gleich lang ist wie die zuvor beschriebenen Variablen. Die Werte jedoch entsprechen den Tischauslenkungen für jedes aufgenommene Bild.

Definition der Variablen  $A$ , die drei Spalten mit den Werten von  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  enthält. Die Länge ist identisch mit denen der anderen Variablen (s. *Abbildung 58*).



**Abbildung 60: Schematische Darstellung der transponierten Variablen  $A'$**

Gleichung für die Unbekannten aufstellen  
 $Un = (A' * A)/(A' * A') * z$  und man erhält jeweils einen Wert für  $t_1$ ,  $t_2$  und  $t_3$ .

## 6.6 Fehlerquellen

Bei der Vermessung von Objekten kann es zu einigen Fehlern kommen.

### **Mögliche Fehlerquellen des Systems:**

- Kameraüberbelichtung
- falsche Justierung des Objektes
- Reflexion auf dem Objekt
- stark reflektierende Oberfläche
- schlecht eingestellter Fokus



## 7. Ermittlung und Auswertung der Messergebnisse

### 7.1 Software Calypso

Calypso ist eine CAD-basierende Software, die bei der UPMC Carat 550 von Zeiss Anwendung findet. Calypso erstellt Prüfpläne und ermöglicht damit eine Auswertung und Darstellung der Messergebnisse. Durch die Generierung von Fahrwegen ermöglicht Calypso eine weitestgehend kollisionsfreie Messung.

Darüber hinaus werden mit der Software die Messpunkte vom Geräte-Koordinatensystem in jedes beliebige Werkstückkoordinatensystem transformiert. Des Weiteren verwendet Calypso automatisch die richtigen Berechnungsverfahren bei allen Maß-, Form- und Lageauswertungen und erhöht damit die Messsicherheit.

### 7.2 ZAPHOD

Die Software ZAPHOD wurde im ZOT entwickelt um das präzise Analysieren von Messergebnissen zu ermöglichen. Durch ZAPHOD kann die gemessene Werkstückoberfläche topographisch dargestellt werden, da aus einer Punkteliste eine exakte Freiformoberfläche berechnet werden kann.

Die erfasste Istfläche eines Objektes kann zusammen mit der Sollfläche in ZAPHOD ausgewertet werden. Somit ist ein detaillierter Vergleich von Ist- und Sollfläche möglich.

Zaphod zeichnet sich zudem durch verschiedene Bearbeitungsoptionen aus, die es ermöglichen eine geeignete Vergleichsfläche zu schaffen.

Liegt die Sollfläche des gemessenen Werkstückes vor, kann diese mit Hilfe von Zaphod von der Istfläche abgezogen werden. Anschließend kann man die Fläche (Ist-Soll) weiter bearbeiten um möglichst geringe Abweichungen zu erhalten (PV- und RMS-Wert, s. *Punkt 7.3*)

Im Folgenden werden einige Bearbeitungsschritte aufgelistet, die mit Zaphod möglich sind:

- Radial abschneiden
- Kippung abziehen
- Ausreißer eliminieren
- Offset bereinigen
- X-/Y beschneiden
- Zernike-Fringes abziehen

Diese genannten Bearbeitungsoptionen ermöglichen zum Beispiel, das fehlerhafte Messpunkte oder Verkippungen des Messobjektes entfernt werden und somit geeignete Flächen entstehen, die ausgewertet werden können.

### 7.3 Peak to Valley und Root Mean Square

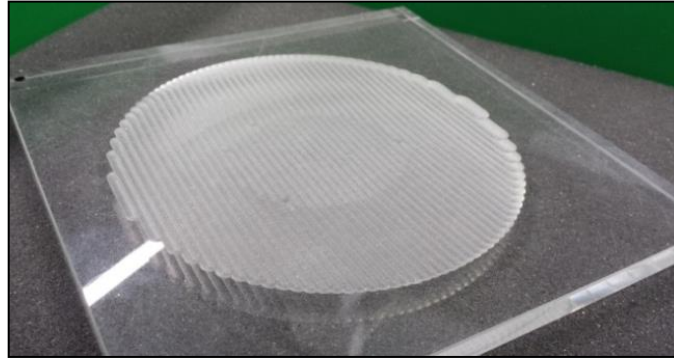
Um eine möglichst gute Vergleichsfläche in Zaphod zu generieren orientiert man sich an den RMS- und PV-Werten, die möglichst klein zu halten sind.

Der **RMS**-Wert ist definiert als die mittlere quadratische Abweichung der Oberfläche.

Der **PV**-Wert beschreibt die Differenz zwischen dem höchsten Berg und dem tiefsten Tal des Oberflächenprofils. Im Gegensatz zum RMS-Wert ist der PV-Wert anfälliger für Messwertausreißer und liefert somit einen ungenaueren Wert.

## 7.4 Vergleich UPMC und Streifenprojektionsgerät

Die Oberfläche eines Objektes wurde mit dem Streifenprojektionsgerät und mit der UPMC Carat 550 von Zeiss vermessen und die zwei Flächen anschließend objektiv miteinander verglichen. Als Messobjekt diente eine Sekundäroptik mit Frässpuren (s. *Abbildung 61*).

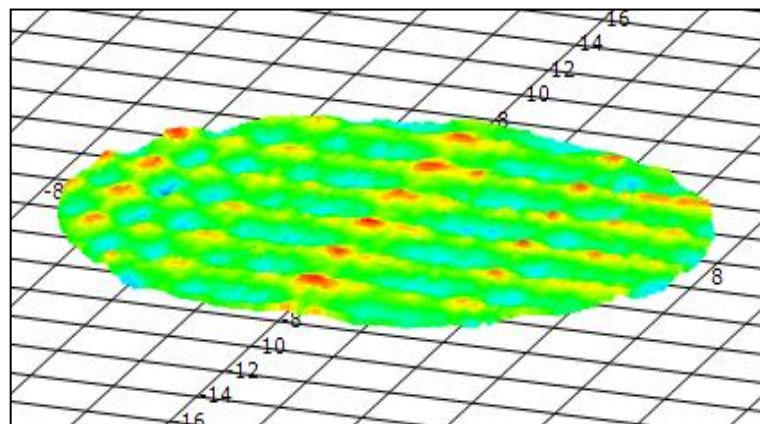


**Abbildung 61: Messobjekt Sekundäroptik**

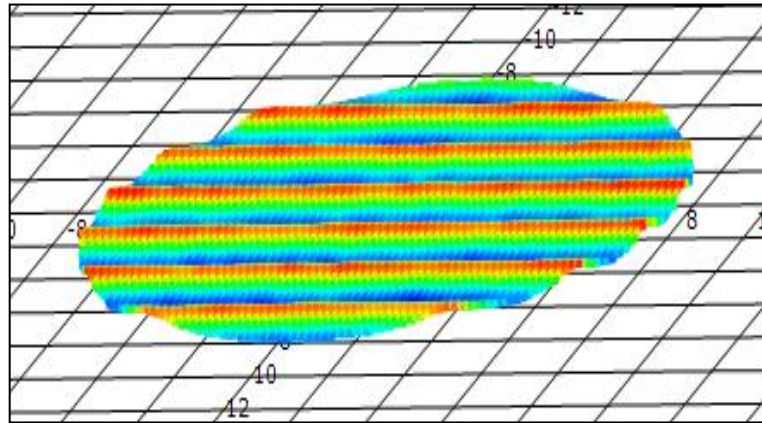
Die beiden resultierenden Bilder der Oberfläche der Sekundäroptik wurden in Zaphod mit folgenden Schritten bearbeitet:

- zum Ursprung verschieben
- Radial abschneiden
- Zernike-Fringes abziehen
- Kippung abziehen

Nach dem Zuschneiden erhält man folgende Oberflächen, die in *Abbildung 62* und in *Abbildung 63* zu sehen sind (x- und y-Achse in mm-Angabe).



**Abbildung 62: Erfasste Oberfläche mit SPG in Falschfarbendarstellung;  
rot = hoch, blau = tief**



**Abbildung 63: Oberfläche vermessen mit UPMC Carat 550 in Falschfarbendarstellung;  
rot = hoch, blau = tief**

Anhand der zwei Abbildungen lässt sich aussagen, dass beide Messgeräte die Frässpuren der Sekundäroptik detektieren. Die UPMC erfasst diese sehr präzise und findet klare Abgrenzungen zwischen den einzelnen Strukturen. Das Streifenprojektionsgerät erkennt die Vertiefungen zwar auch, jedoch nicht so detailliert wie die UPMC.

Mit diesem rein objektiven Vergleich lässt sich nicht sehr viel über die Messgenauigkeit des Streifenprojektionsgeräts aussagen. Deshalb ist es notwendig weitere Messungen durchzuführen. Dennoch kann angenommen werden, dass die Detektion feiner Strukturen mit Kanten ein Problem für das selbstentwickelte Gerät darstellt.

## 7.5 Messung der Kalibrierhäufigkeit

Mit unterschiedlichen Kalibriereinstellungen des Streifenprojektionsgerätes wurde geprüft, wie sich die PV- und RMS-Werte der Kalibrier-/Referenzfläche ändern. Der Ausschnitt auf den kalibriert wird bleibt für jede Kalibriereinstellung gleich, lediglich Z Step size und Z Steps variieren.

Die Einstellung der Parameter „Exposure“, „Gain“, „Focus“ und „WhiteBalance“ vor den Messungen war wie folgt:

- Exposure: -6
- Gain: 0
- Focus: 102
- WhiteBalance: 5295

Es erfolgten vier Messungen, mit den in *Abbildung 64* vorgenommenen Einstellungen der Größen Z Step size und Z Steps. Die Länge des Kalibrierbereichs,  $Z_g = 40$  mm, wurde für alle durchgeführten Kalibrierbereiche eingehalten.

Kalibriereinstellung	Z Step size (mm)	Z Steps
1	20	3
2	10	5
3	5	9
4	4	11

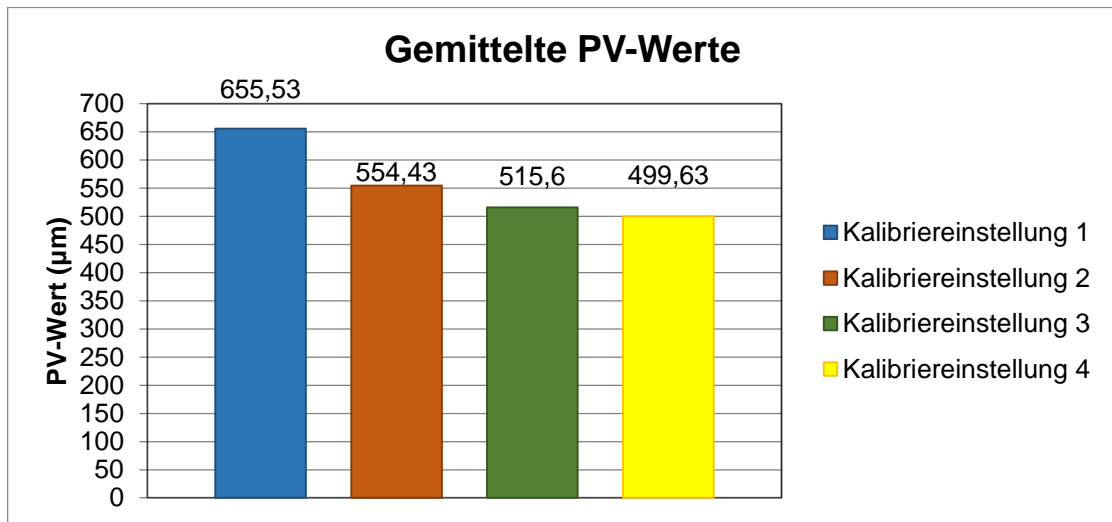
**Abbildung 64: Ausgewählte Werte für die Kalibriereinstellung**

Mit der *Gleichung 7.1* kann die Anzahl an aufzunehmenden Bildern, bei gleich bleibendem Kalibrierbereich und variierender Z Step size, bestimmt werden.

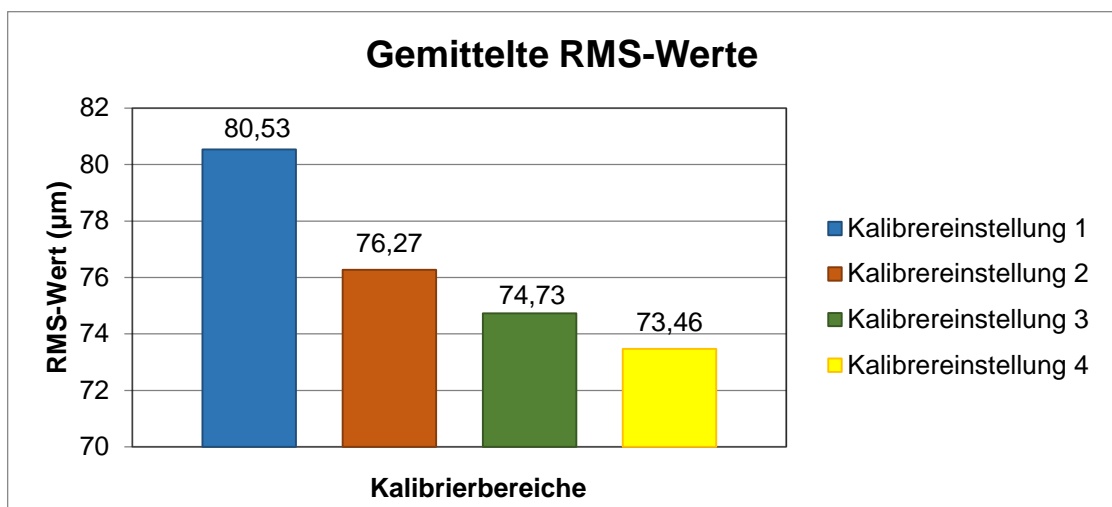
$$Z \text{ Steps} = (Z_g + Z \text{ step size}) / Z \text{ Step size} \quad (7.1)$$

mit  $Z_g$  = Länge des Kalibrierbereiches (hier: 40 mm)  
 $B = Z \text{ Steps}$  (Anzahl der Bilder, die aufgenommen werden soll)  
 $dz = Z \text{ Step size}$  (gewünschte Schrittweite)

Für jede Kalibriereinstellung wurden drei Messungen eines Kalibrierbereiches durchgeführt und anschließend über die erhaltenen PV- und RMS-Werte gemittelt. Die grafischen Ergebnisse sind in *Abbildung 65* und in *Abbildung 66* präsentiert. Die tabellarischen Ergebnisse (PV- und RMS-Werte) befinden sich im Anhang der Arbeit (s. *Anhang B*).



**Abbildung 65: Mittelwert der PV-Werte der vier Kalibrierbereiche**



**Abbildung 66: Mittelwert RMS-Werte der vier Kalibrierbereiche**

Auffällig ist, dass die gemittelten PV- und RMS Werte der Messungen geringer werden, je kleiner die gewählte Schrittweite wird und umso mehr Bilder aufgenommen werden.

Weiterhin lässt sich feststellen, dass sich die Messergebnisse von Kalibriereinstellung 2 im Vergleich zur Kalibriereinstellung 1 stark verringern, wohingegen die Ergebnisse von Kalibriereinstellung 3 und 4 nicht sehr von denen der Kalibriereinstellung 2 abweichen

Für den definierten Kalibrierausschnitt würde demzufolge die Kalibriereinstellung 2 ausreichen um diesen gut zu erfassen.

Abschließend ist festzustellen, dass beim Kalibrieren des Streifenprojektionsgerätes darauf zu achten ist, dass der Ausschnitt, der kalibriert werden soll möglichst genau erfasst wird. Dies wird durch die Wahl einer eher kleineren Schrittweite erreicht.

## 7.6 Messungen unter Wiederholbedingungen

Um zufällige Einflüsse unter Umgebungsbedingungen zu untersuchen, wurden Messungen unter Wiederholbedingungen durchgeführt. Nach DIN 1319 sind die Wiederholbedingungen definiert als „die Bedingungen, unter denen wiederholt einzelne Messwerte für dieselbe spezielle Messgröße unabhängig voneinander so gewonnen werden, dass die systematische Messabweichung für jeden Messwert die gleiche bleibt.“ [2]

Unter zufälligen Einflüssen sind Dinge wie Kameraauschen, Erschütterungen in der Umgebung und Beugungseffekte gemeint.

Die Durchführung der Messungen erfolgte mit konstanten Parametern. Zu diesen zählen unter anderem:

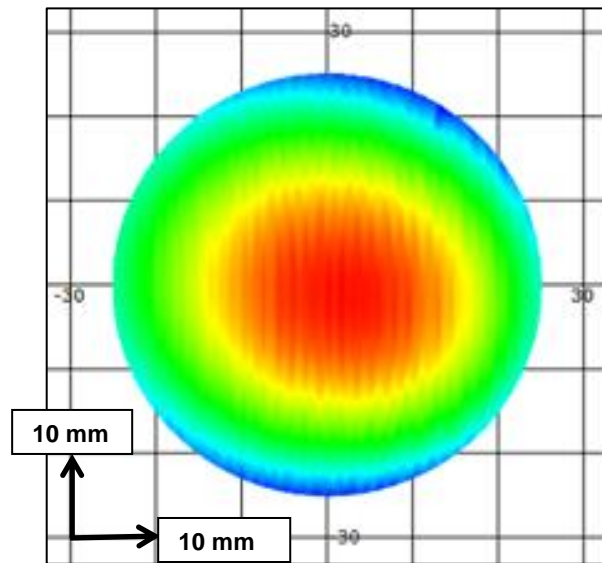
- gleicher Prüfer
- unveränderter Aufbau am gleichen Ort
- identisches Messobjekt
- kurze Zeitdifferenz zwischen den Messungen

Insgesamt wurden 20 Messungen eines Ausschnittes einer Asphäre durchgeführt. Das Zeitintervall zwischen den einzelnen Messungen belief sich auf ca. eineinhalb Minuten.

Das Messsystem wurde vor Beginn der Messungen mit folgender Gerätekonfiguration kalibriert:

- Z Step size: 4 mm
- Z Steps: 11 Bilder
- Exposure: -6
- Gain: 0
- Focus: 102
- WhiteBalance 5295

Nach dem Positionieren des Messobjektes, wurde „Exposure“ auf -7 eingestellt.

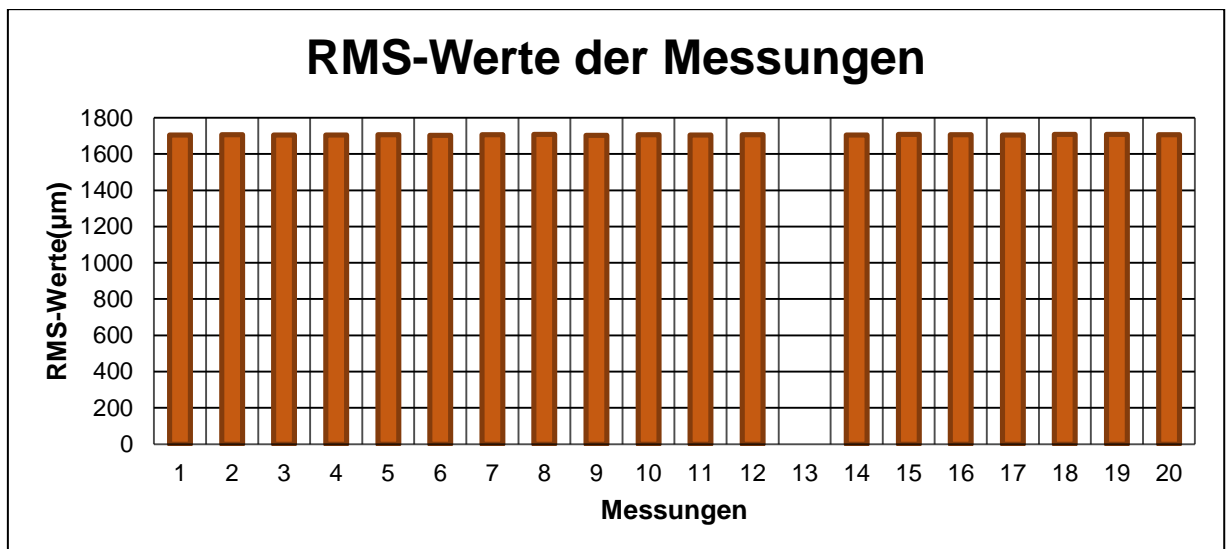


**Abbildung 67: Erstes Messergebnis der Asphäre**

In *Abbildung 67* ist ein Ausschnitt der erfassten Asphärenoberfläche der ersten durchgeführten Messung dargestellt.

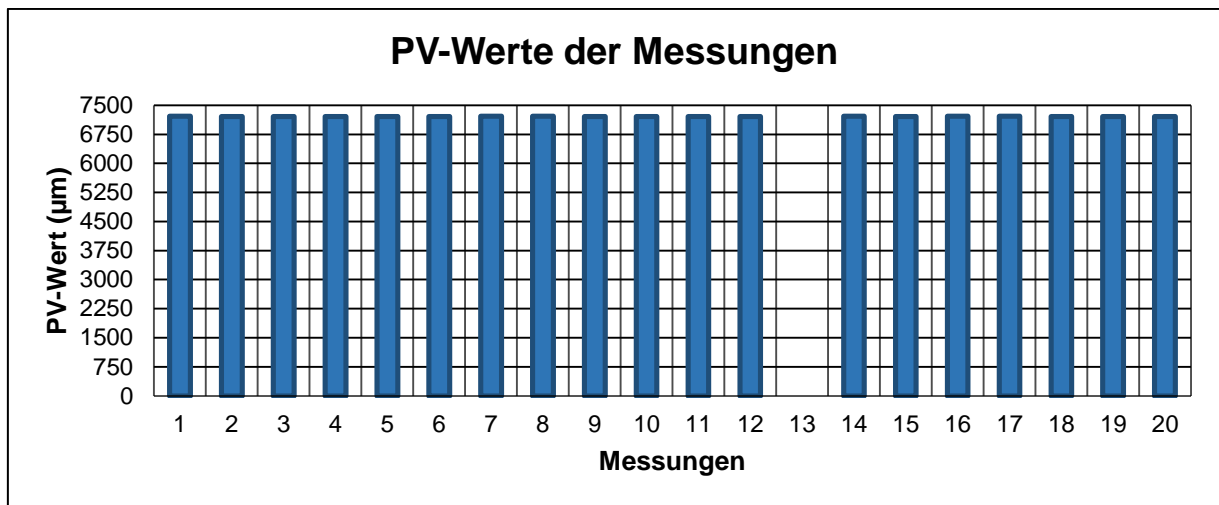
Die folgende *Abbildung 68* und die *Abbildung 69* zeigen die RMS- und PV-Werte der 20 durchgeführten Messungen.

Die tabellarischen Messergebnisse befinden sich im Anhang der Bachelorarbeit (s. *Anhang C*).



**Abbildung 68: Mittelwert von 1706,2 µm und Standardabweichung von 1,5 µm der RMS-Werte der 20 Messungen**





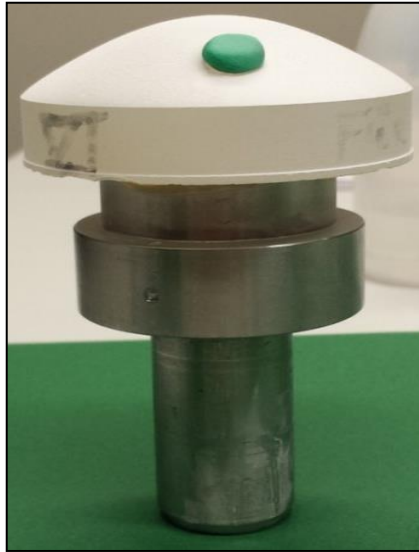
**Abbildung 69: Mittelwert von 7212,9 µm und Standardabweichung von 1,7 µm der PV-Werte der 20 Messungen**

Die PV-Werte der Messungen bleiben relativ konstant bis auf einen Ausreißer (13. Messwert). Dieser lässt sich als Messfehler deklarieren und wurde daher in der oben dargestellten Mittelwerts- und Standardabweichungsberechnung nicht berücksichtigt.

Die RMS- sowie die PV-Werte der 20 durchgeführten Messungen weisen beide eine geringe Standardabweichung auf. Daher kann angenommen werden, dass die Messungen mit dem Streifenprojektionsgerät hinsichtlich dieser 20 Messungen wiederholbar sind.

## 7.7 Überprüfung der Reproduzierbarkeit

Geprüft wurde die Reproduzierbarkeit des Streifenprojektionsgerätes bei der Vermessung eines Objektes in unterschiedlichen Positionen. Nach DGQ 11-04 wird die Reproduzierbarkeit definiert als „der Ausmaß der Annäherung zwischen den Ergebnissen von Messungen derselben Messgröße, wobei die einzelnen Messungen bei unterschiedlichen Bedingungen ausgeführt sind.“ [2] Als Objekt wurde eine Asphäre verwendet und acht Messungen bei unterschiedlicher Positionierung (Verdrehung des Messobjektes um ca. 25°) der Asphäre durchgeführt. Als Orientierungspunkt diente dabei ein Stück Knetmasse, das auf dem Prüfling befestigt wurde (s. *Abbildung 70*).



**Abbildung 70: Asphäre mit grünem Markierungspunkt**

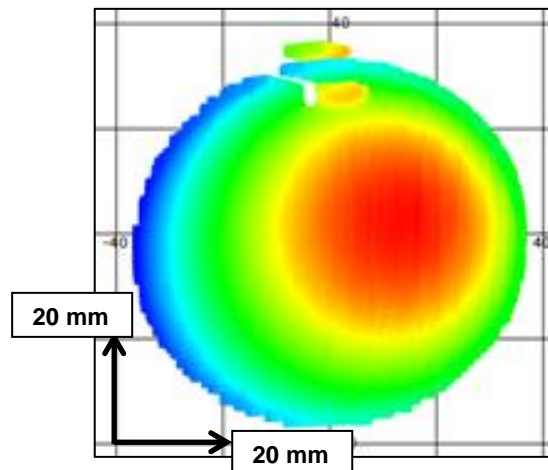
Das Messsystem wurde für die Messungen mit folgender Gerätekonfiguration kalibriert:

- Z Step size: 10 mm
- Z Steps: 7 Bilder
- Exposure: -6
- Gain: 0
- Focus: 102
- WhiteBalance 5295

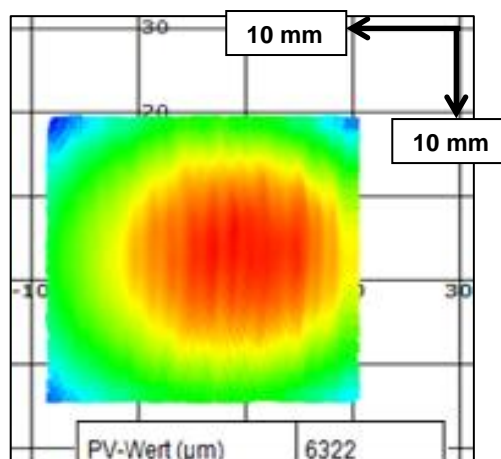
Nachdem Beenden der Kalibrierung wurde die Asphäre zum Messen am Objektträger befestigt. Anschließend erfolgte die Regelung der Einstellung „Exposure“ auf -5, während alle anderen Einstellungen beibehalten wurden.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen das erste Messergebnis der Asphärenoberfläche in der als 90 Grad markierten Position. In *Abbildung 71* ist die gemessene Oberfläche in der Ausgangsposition (Messposition) dargestellt. Die *Abbildung 72* visualisiert die, in Zaphod bearbeitete, Oberfläche.

Die Messergebnisse, der zugeschnittenen Oberflächen, befinden sich im Anhang dieser Arbeit (s. *Anhang D*).



**Abbildung 71: Erste Messung der Asphäre in der Ausgangsposition**



**Abbildung 72: Messergebnis der zugeschnittenen Asphäre**

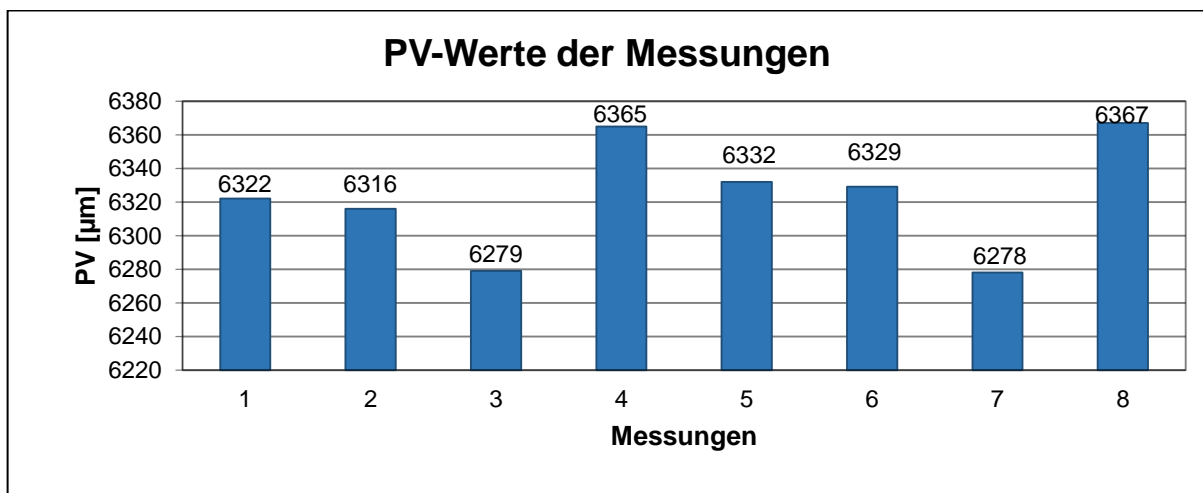
Das Zuschneiden der Oberfläche mit dem Bearbeitungsprogramm ZAPHOD ist notwendig, um die Orientierungsmarke aus dem Ergebnis herauszuschneiden. Der Orientierungspunkt würde die Messergebnisse verfälschen, sodass die acht Messungen miteinander nicht aussagekräftig vergleichbar wären.

Das Zuschneiden der acht Messergebnisse in Zaphod erfolgte mit jeweils denselben Schritten:

- zum Ursprung verschieben
- X & Y beschneiden

In der *Abbildung 73* sind die PV-Werte der Messergebnisse der acht zugeschnittenen Oberflächen dargestellt. Aus der Grafik lässt sich ablesen, dass sich die Messergebnisse beim Wechsel der Asphärenposition ändern. Der minimalste Wert beträgt 6278  $\mu\text{m}$ , der maximalste Wert beläuft sich auf 6367  $\mu\text{m}$ . Damit liegt die Messdifferenz bei 89  $\mu\text{m}$ . Die unterschiedlichen Messergebnisse entstehen durch die Dezentrierung der Asphäre beim manuellen Drehen.

Aufgrund der nur geringen Veränderung der Messergebnisse desselben Objektes in unterschiedlichen Positionen lässt sich insgesamt sagen, dass diese mit einer Standardabweichung von 33,4  $\mu\text{m}$  reproduzierbar sind.



**Abbildung 73: Mittelwert von 6323,5  $\mu\text{m}$  und Standardabweichung von 33,4  $\mu\text{m}$  der PV-Werte der acht Messungen**

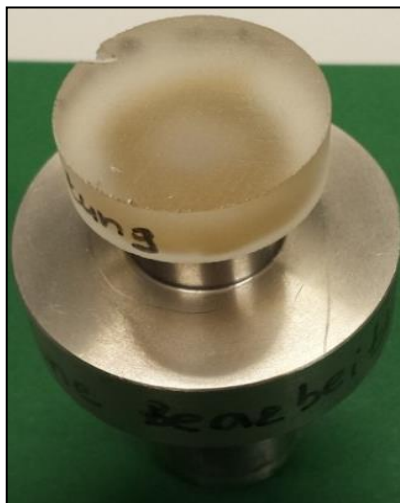
## 7.8 Überprüfung der Messgenauigkeit

Die folgenden Messdurchführungen dienen dazu, die Messgenauigkeit des Streifenprojektionsgerätes zu untersuchen.

Unter Messgenauigkeit wird „das Ausmaß der Annäherung eines Messwerts an einen wahren Wert einer Messgröße“ verstanden. [27]

Für die Messungen wurden ausgewählte Objekte mit den messtechnischen Geräten, Weißlichtinterferometer und UPMC, vermessen und die Ergebnisse für das Streifenprojektionsgerät als Referenzwert angenommen.

Als Messobjekt wurde zu Beginn eine „plane“, etwas raue Fläche ausgewählt (s. *Abbildung 74*), die zunächst mit dem Weißlichtinterferometer vermessen wurde.

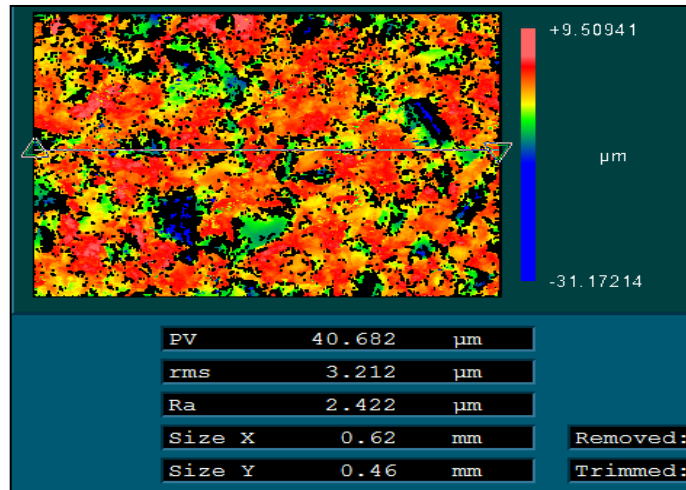


**Abbildung 74: "Planes" Messobjekt**

Anschließend erfolgte die Messung der Oberfläche des Objektes mit dem Streifenprojektionsgerät.

Anhand der Messergebnisse des Weißlichtinterferometers lässt sich in *Abbildung 75* erkennen, dass die Oberfläche nicht ganz detektiert werden konnte. Erklären lässt sich dies dadurch, dass sehr feine Strukturen auf der Messoberfläche vorhanden sind und somit eine große Auflösung erforderlich war, um diese zu erfassen.

Anhand der Messergebnisse des Weißlichtinterferometers lässt sich in *Abbildung 75* erkennen, dass die Oberfläche nicht ganz detektiert werden konnte. Erklären lässt sich dies dadurch, dass sehr feine Strukturen auf der Messoberfläche vorhanden sind und somit eine große Auflösung erforderlich war, um diese zu erfassen.



**Abbildung 75: Erstes Messergebnis der Oberfläche, gemessen mit dem WLI**

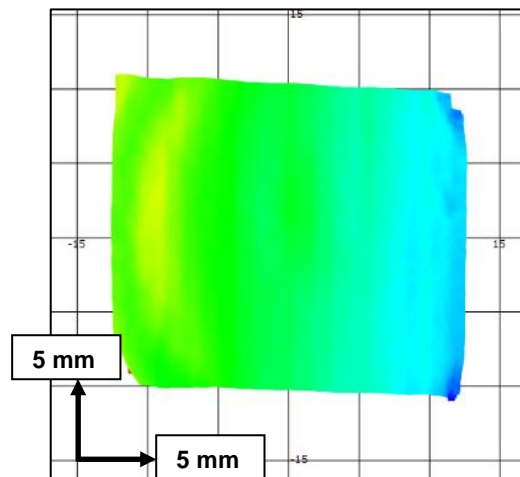
Um die Oberfläche des Messobjektes dennoch gut qualifizieren zu können, wurden mit dem Mikrointerferometer 20 kleine Ausschnitte, an unterschiedlichen Stellen, des Objektes gemessen (Messergebnisse s. *Anhang E*). Es zeigte sich über die 20 Messungen der gemittelte RMS-Wert von 3,62 µm mit einer Standardabweichung von 0,68 µm (s. *Abbildung 78*).

Anschließend erfolgten 10 Messungen der Oberfläche des Messobjektes mit dem Streifenprojektionsgerät (tabellarische Messergebnisse, s. *Anhang E*).

Das Messsystem wurde vorab mit folgender Gerätekonfiguration kalibriert:

- Z Step size: 10 mm
- Z Steps: 5 Bilder
- Exposure: -7
- Gain: 0
- Focus: 102
- White Balance 5295

In *Abbildung 76* ist einer der zehn gemessenen Objektausschnitte dargestellt.

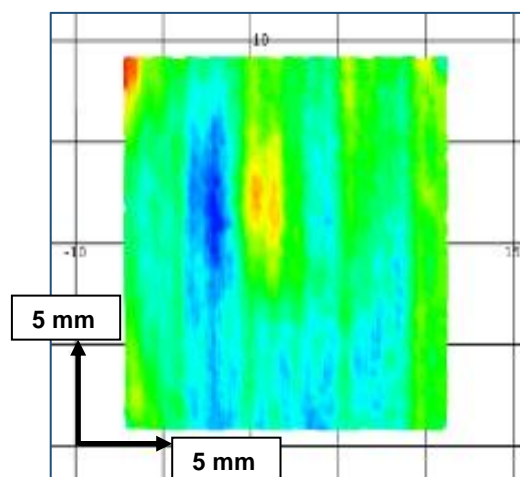


**Abbildung 76: Unbearbeiteter Objektausschnitt des Messobjekts**

Bei den Messungen wurden störende Stellen vom Hintergrund erfasst, weshalb die Ausschnitte, bevor diese ausgewertet werden können, in Zaphod zugeschnitten werden mussten. Das Zuschneiden erfolgte mit den aufgelisteten Schritten:

- zum Ursprung verschieben
- Zernike-Fringes abziehen
- X & Y beschneiden

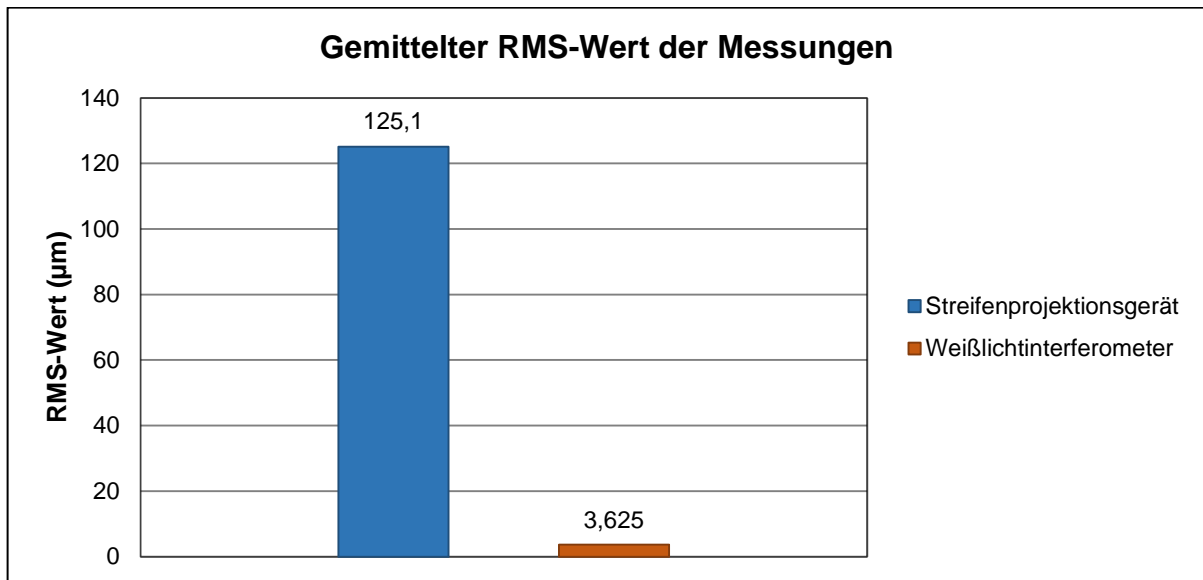
Die *Abbildung 77* zeigt den zugeschnittenen Objektausschnitt einer Messung.



**Abbildung 77: Zugeschnittene Oberfläche des Messobjektes**

Wie oben schon erwähnt, zeigen die 20 Messungen mit dem Weißlichtinterferometer zeigen, wie oben schon erwähnt, den gemittelten RMS-Wert von  $3,62\text{ }\mu\text{m}$ .

Das Messergebnis der 10 Messungen mit dem Streifenprojektionsgerät weist einen RMS-Wert von  $125,125\text{ }\mu\text{m}$  auf.



**Abbildung 78: Gemittelter RMS-Wert der Messungen mit dem WLI (Standardabweichung  $0,688\text{ }\mu\text{m}$ ) und dem SPG (Standardabweichung  $0,56\text{ }\mu\text{m}$ )**

Es war zu erwarten, dass das Streifenprojektionsgerät deutlich ungenauer misst als das Weißlichtinterferometer. Dennoch erhoffte man sich eine nicht ganz so große Differenz zu den Referenzwerten.

Im Folgenden wurde deshalb versucht, durch einige Veränderungen, die Messgenauigkeit des Streifenprojektionsgerätes zu verbessern um eine geringere Abweichung zum Messergebnis des Weißlichtinterferometers zu erhalten.

Zunächst wurde das weiße Papier auf der Referenz-/Kalibrierplatte entfernt, da es nicht mehr straff genug gespannt war. Des Weiteren könnte aufgrund der Rauigkeit des Papiers eine Beeinträchtigung der Kalibrierung entstanden sein und damit die Messgenauigkeit beeinflusst haben. Nach dem Entfernen des Papiers wurde die Edelstahlplatte mit Entspiegungsspray besprüht um Reflexe zu vermeiden.

Ein weiterer Punkt, der einen Einfluss auf die „schlechten“ Werte der resultierenden Messunsicherheit hat, ist die mangelnde Synchronisation zwischen Kamera und Projektor.



Zur Behebung dieses Problems kann ein Projektor mit einer hohen Lichtleistung und minimaler Verzerrung gekauft werden.

Desweiteren sollte ein Projektor verwendet werden, dessen Auflösung mindestens so groß ist wie die der Webcam, um eine Beschränkung der Rekonstruktionsauflösung auf der Kamera zu vermeiden. Da eine Anschaffung solch eines Projektors aber mit hohen Kosten verbunden ist, wurde nach einer anderen Lösung gesucht.

Wie in *Punkt 6.3.1* bereits erklärt wurde, läuft das Streifenmuster in vier Phasen über das Objekt, wobei die Kamera pro Phase eine bestimmte Anzahl an Bildern aufnimmt. Anschließend wird über jedes Pixel der aufgenommenen Bilder gemittelt und diese zum Schluss ausgewertet.

Die Anzahl der Bilder über die gemittelt werden soll, wurde von vier Bildern auf 50 Bilder erhöht. Nach den vorgenommenen Veränderungen (Papierentfernung, Erhöhung der Anzahl der Bilder) wurden erneut Messungen mit dem Streifenprojektionsgerät durchgeführt.

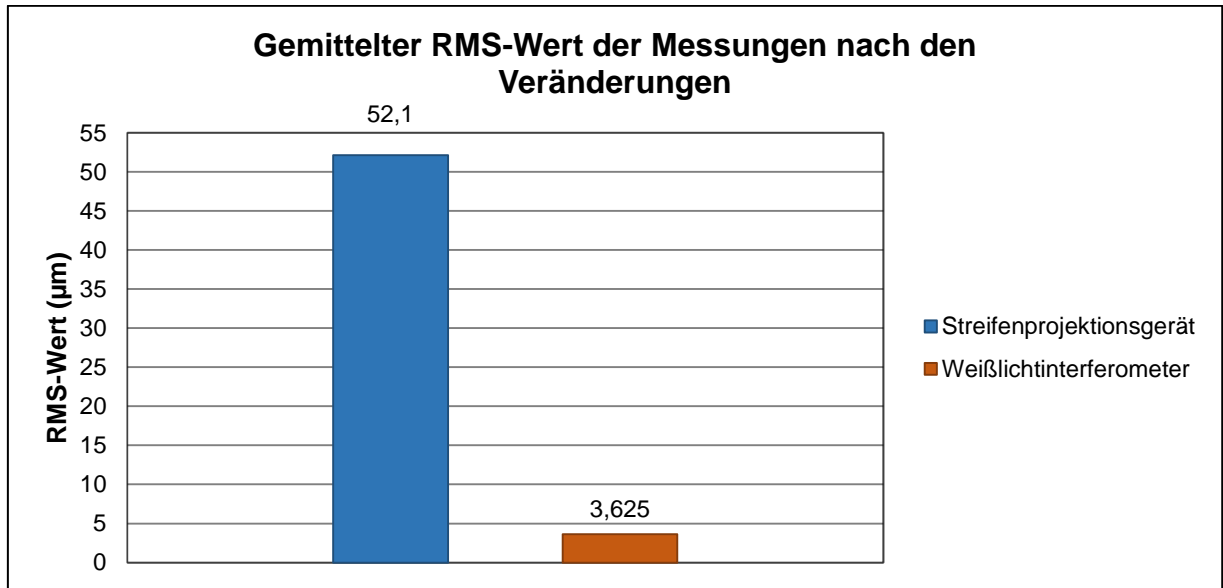
Das Streifenprojektionsgerät wurde dafür mit den identischen Geräteeinstellungen aus der vorherigen Messung kalibriert.

Die erfassten 10 Ausschnitte der Objektoberfläche wurden in ZAPHOD mit folgenden Schritten bearbeitet:

- zum Ursprung verschieben
- Zernike-Fringes abziehen
- X & Y beschneiden

Die Messergebnisse befinden sich im *Anhang E* der Bachelorarbeit.

Der „neue“, über die 10 Messungen, gemittelte RMS-Wert von 52,125  $\mu\text{m}$  zeigt eine deutliche Verbesserung gegenüber dem ersten Messergebnis. Der RMS-Wert entspricht nur noch ungefähr der Hälfte des zuvor erhaltenen RMS-Wertes.

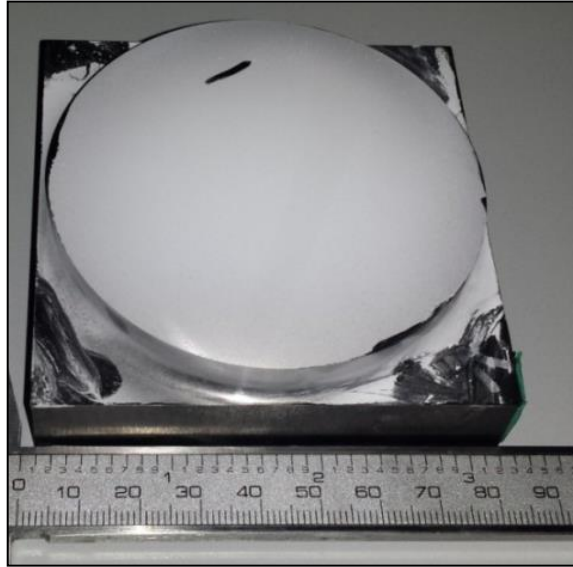


**Abbildung 79: "Neuer" gemittelter RMS-Wert der Messungen mit dem WLI (Standardabweichung 0,688 µm) und dem SPG (Standardabweichung 0,47 µm)**

Mit den vorgenommenen Veränderungen (Papierentfernung, Erhöhung der Anzahl der Bilder) konnte eine geringere Abweichung der Messergebnisse des Streifenprojektionsgerätes zu den Referenzwerten erhalten und somit die Messgenauigkeit des Geräts deutlich verbessert werden.

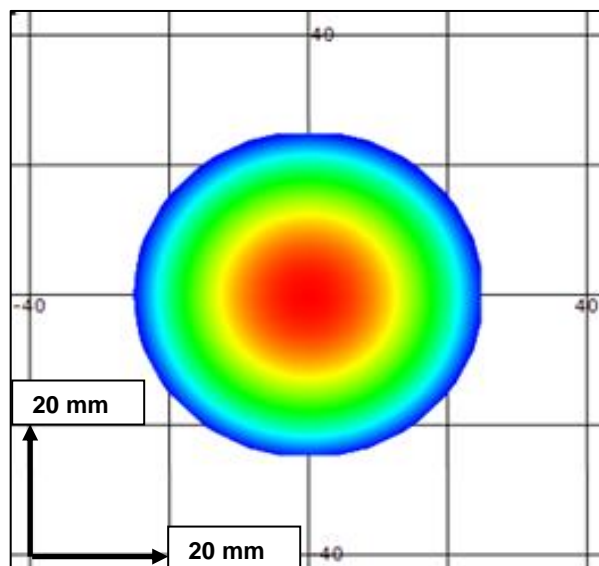
Mit dem Weißlichtinterferometer wird nicht die globale Struktur, sondern lediglich die Mikrorauigkeit des Objekts erfasst. Globale Welligkeiten können mit dem messtechnischen Gerät nicht detektiert werden. Daher sind die beiden Messdurchführungen des Streifenprojektionsgerätes und des Mikrointerferometers schwer miteinander vergleichbar. Im weiteren Verlauf wurde deshalb eine bereits vordefinierte DMG-Asphäre (s. *Abbildung 80*) von der die globale Struktur bekannt ist, mit dem Streifenprojektionsgerät vermessen. Vordefiniert heißt, dass die Geometrie der Asphäre bereits mit der UPMC erfasst worden ist.

Für die nachfolgenden Messungen wurde die Edelstahlreferenz-/ Kalibrierplatte gegen eine Glasplatte ausgetauscht.



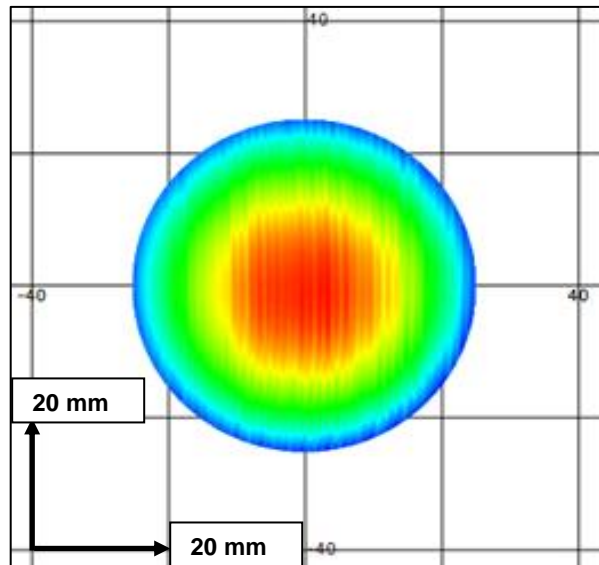
**Abbildung 80: Messobjekt DMG-Asphäre**

Die gemessene Oberfläche der DMG-Asphäre mit der UPMC ist in *Abbildung 81* dargestellt.



**Abbildung 81: Erfasste Oberfläche der DMG-Asphäre mit UPMC; PV-Wert 3633,01  $\mu\text{m}$**

Die *Abbildung 82* visualisiert die, mit dem Streifenprojektionsgerät, erfasste Oberfläche des Messobjektes.



**Abbildung 82: Erfasste Oberfläche der DMG-Asphäre mit SPG; PV-Wert 3166,97  $\mu\text{m}$**

Die erfassten Oberflächen wurden in ZAPHOD mit folgenden Schritten bearbeitet:

- zum Ursprung verschieben
- Radial abschneiden
- Äquidistant 2D

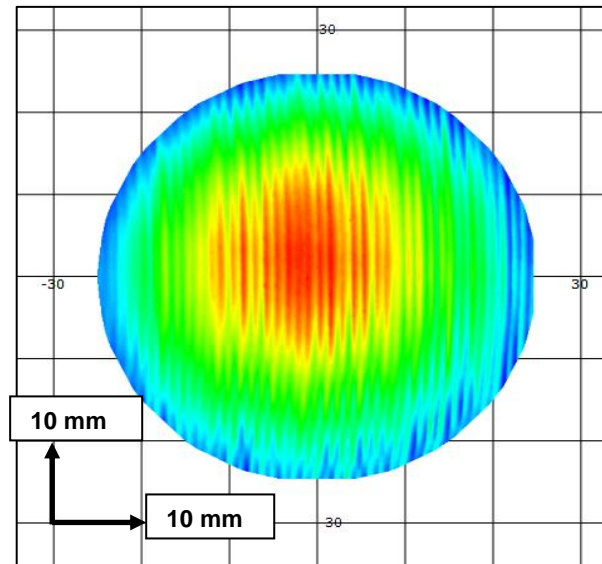
Aus der *Abbildung 82* lässt sich erkennen, dass die erfasste Asphärenoberfläche nicht einheitlich homogen ist, sondern dass ein Rauschen zu sehen ist.

Das Rauschen sind Interferenzerscheinungen, die aufgrund der Überlagerung von Kamerafrequenz und Bildwiederholungsfrequenz des Projektors entstehen.

Ursprünglich sollten die beiden, mit der UPMC und dem Streifenprojektionsgerät, erfassten Oberflächen in ZAPHOD übereinander gelegt und voneinander abgezogen werden, um den Restfehler zu erhalten.

Jedoch lässt sich vermuten, dass aufgrund der auftretenden Interferenzerscheinungen, auf der mit dem Streifenprojektionsgerät gemessenen Oberfläche, kein aussagekräftiges Ergebnis erhalten werden kann.

Diese Vermutung wird durch die *Abbildung 83* bestätigt, die die resultierende Fläche, nach dem Abziehen beider Oberflächen voneinander, zeigt. Erneut sind die Interferenzerscheinungen sichtbar, die auch den sehr hohen PV-Wert ( $1077,14\text{ }\mu\text{m}$ ) erklären. Dieser wird auch dadurch negativ beeinflusst, da die beiden Flächen nicht exakt 100% aufeinander liegen.



**Abbildung 83: Resultierende Restfläche nach Abziehen; PV-Wert  $1077,14\text{ }\mu\text{m}$**

Im Allgemeinen lässt sich feststellen, dass das Abziehen zweier Flächen voneinander Schwierigkeiten bereitet. Beim Abziehen müssen die Ausschnitte der beiden erfassten Objektoberflächen in ihrer Größe übereinstimmen und darüber hinaus noch exakt übereinander liegen. Deshalb können die Ergebnisse leider nicht aussagekräftig beurteilt werden.

Im Folgenden sind **weitere Einflussfaktoren auf die Messgenauigkeit** aufgelistet:

- Werkstück:
  - Geometrie
  - Oberflächenbeschaffenheit
- Umgebungsbedingungen:
  - Schmutz
  - Vibration
- Bediener:
  - Fehlbedienung

## 7.9 Vergleich von zwei Kalibrier-/Referenzflächen

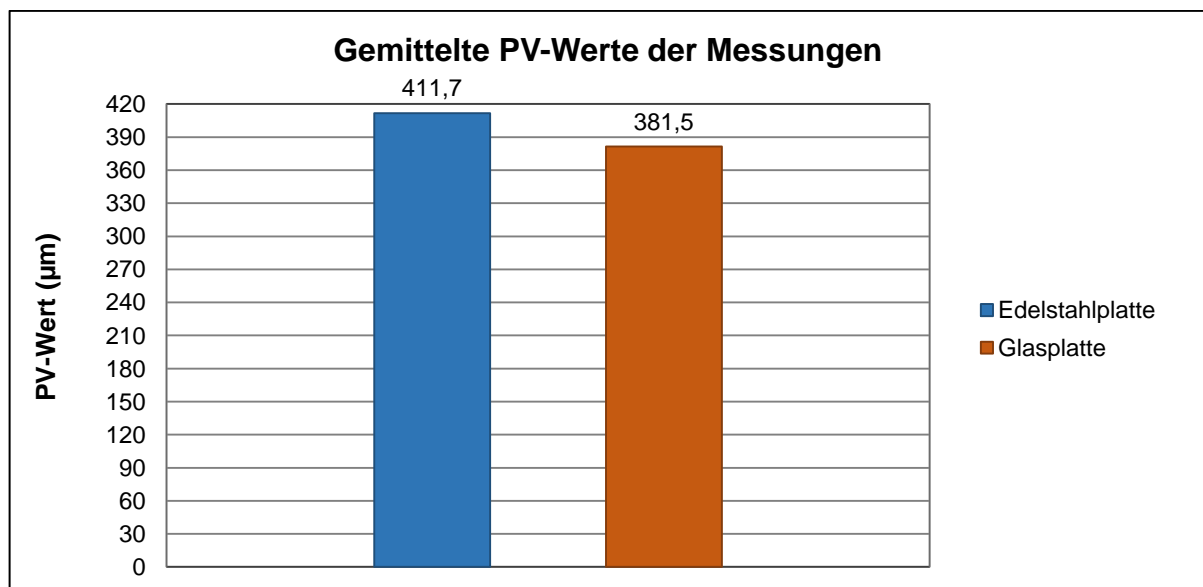
Bisher erfolgte die Kalibrierung des Streifenprojektionsgerätes mit einer Edelstahlplatte. Da diese Platte gewisse Unebenheiten aufweist, erhoffte man sich mit einer Glasplatte noch ein etwas besseres Messergebnis hinsichtlich der Messgenauigkeit zu erzielen. Zunächst wurde überprüft um welchen Wert die Glasplatte genauer ist. Dafür wurde ein Ausschnitt beider Platten 10x vermessen und ausgewertet.

Die zwei Flächen wurden vor der Messdurchführung mit Kreidespray besprüht.

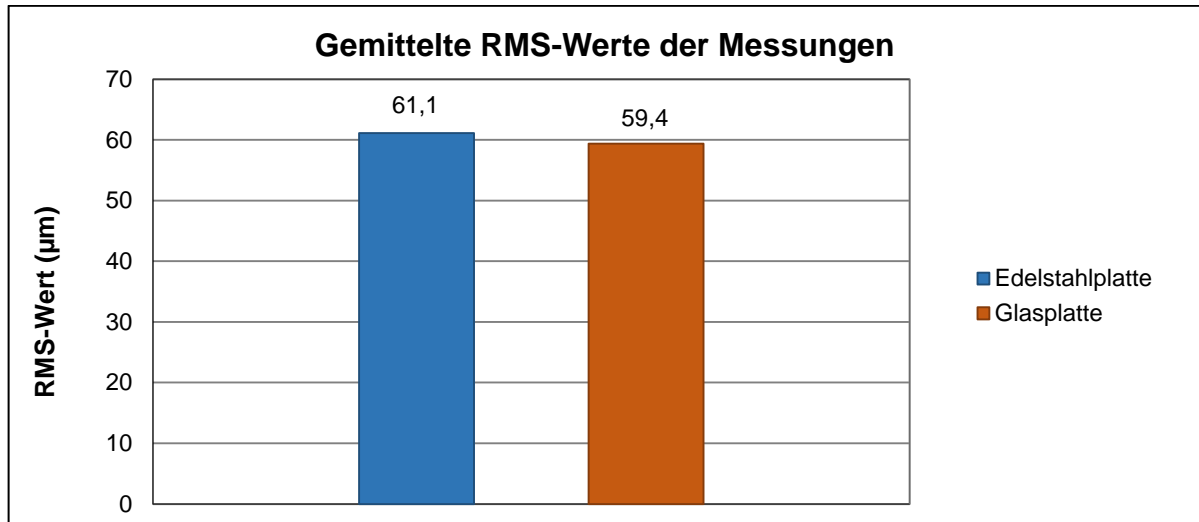
Die Kalibrierung des Messsystems erfolgte mit nachstehender Gerätekonfiguration:

- Z Step size: 10 mm
- Z Steps: 5 Bilder
- Exposure: -7
- Gain: 0
- Focus: 102
- White Balance 5295

Die *Abbildung 84* und die *Abbildung 85* zeigen den gemittelten PV- und RMS-Wert der 10 durchgeführten Messungen. Die Ergebnisse der einzelnen Messungen befinden sich im *Anhang F*.



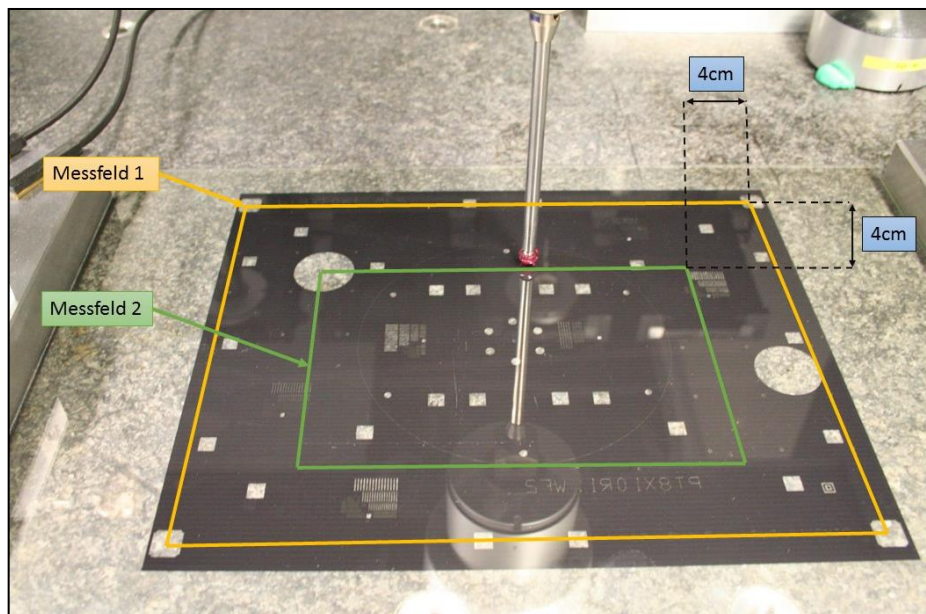
**Abbildung 84: Mittlerer PV-Wert der Messungen; Edelstahlplatte Standardabweichung 0,43 µm und Glasplatte 0,44 µm**



**Abbildung 85: Mittlerer RMS-Wert der Messungen; Edelstahlplatte Standardabweichung 0,17 µm und Glasplatte 0,22 µm**

Festzustellen ist, dass die Glasplatte bezüglich des PV-Wertes um etwa 30 µm genauer ist als die Edelstahlplatte. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die PV-Werte für eine plane Fläche sehr hoch sind. Diese Abweichung lässt sich erneut auf die fehlende Synchronisation zwischen Kamera und Projektor zurückführen.

Anschließend erfolgte die Abtastung der Glasplatte mit der UPMC im Scanningverfahren. Dafür wurden zu Beginn der Messung zwei Messfelder festgelegt (s. *Abbildung 86*).



**Abbildung 86: Abgetastete Messfelder mit der UPMC Carat 550 von Zeiss**

Die Messfelder der Glasplatte zeigten folgende Ergebnisse:

- *Messfeld 1:*

RMS-Wert: 4,9  $\mu\text{m}$

PV-Wert: 25,5  $\mu\text{m}$

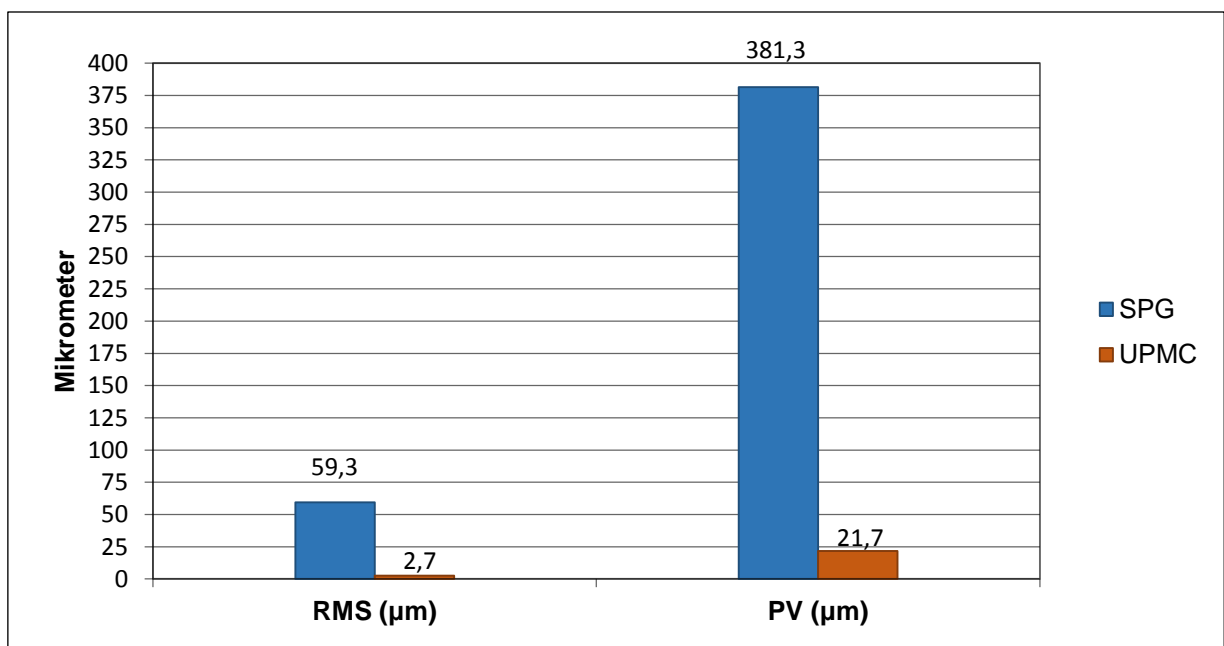
- *Messfeld 2 :*

RMS-Wert: 2,7  $\mu\text{m}$

PV-Wert: 21,7  $\mu\text{m}$

Die Ergebnisse wurden wiederum als Referenzwerte für das Streifenprojektionsgerät definiert.

Mit dem Streifenprojektionsgerät wurde zuvor das Messfeld 2 der Glasplatte gemessen. In der nach folgenden *Abbildung 87* sind die, mit der UPMC und dem SPG, erfassten RMS- und PV-Werte der Glasplatte dargestellt.



**Abbildung 87: Messergebnisse der Glasplatte**

Anhand den Messergebnissen aus *Abbildung 87* ist zu erkennen, dass das Streifenprojektionsgerät eine deutlich größere Abweichung zu den Referenzwerten (ca. Faktor 20) zeigt. Grund hierfür kann wiederum die fehlende Synchronisation sein.



## 7.10 Festlegung des Messvolumens

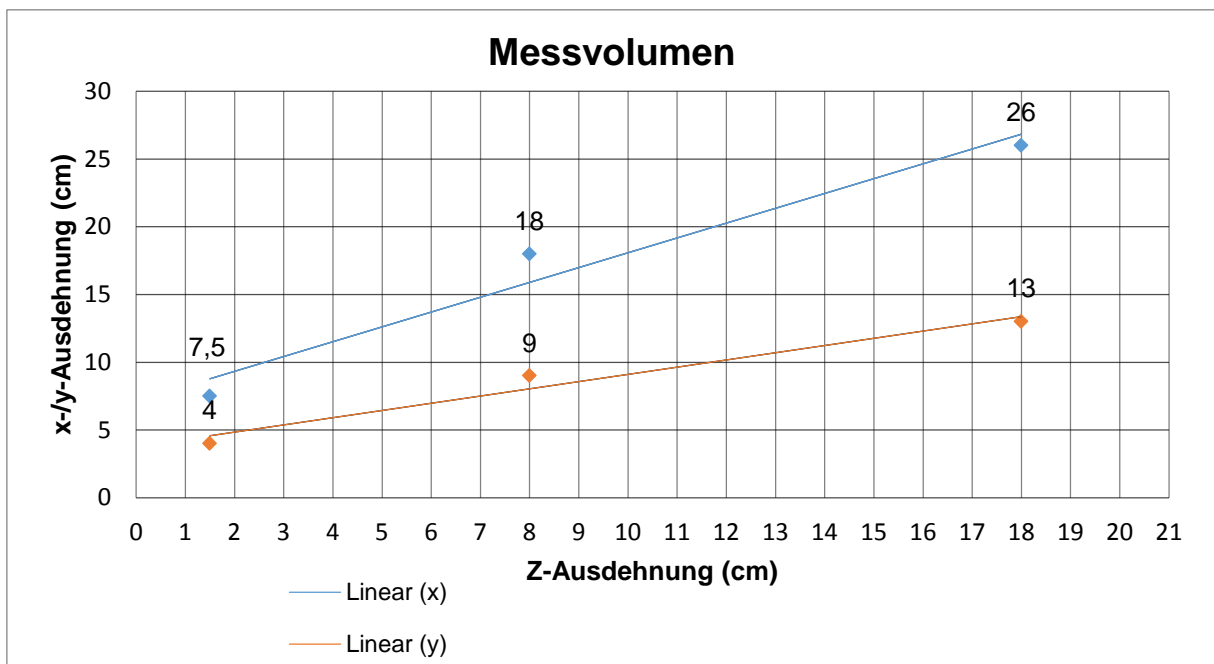
Im Folgenden wurden das minimale und das maximale Messvolumen, das mit dem Streifenprojektionsgerät erreicht werden kann, definiert.

Der motorische Mikrostelltisch kann auf einer Länge (z-Richtung) von ca. 21 cm bewegt werden. Jedoch sind die 21 cm nicht voll nutzbar, da noch Freiraum für das Kalibrieren an beiden Enden der Linearachse gebraucht wird. In z-Richtung kann deshalb lediglich auf einer Länge von 16 cm gemessen werden.

In der Position, mit dem kleinsten Abstand zur Kamera, können kleine Objekte, die in x-Richtung die Größe 7,5 cm und in y-Richtung die Größe 4 cm haben, gemessen werden. Soll diese Objektgröße vermessen werden, ist darauf zu achten, dass nur mit sieben Bildern und 5 mm kalibriert werden kann. Damit ist das linke Ende der Linearachse erreicht.

In der entferntesten Position zur Kamera besteht die Möglichkeit, Objekte mit den Maßen  $x = 26$  cm und  $y = 13$  cm zu vermessen. Auch hier muss eine Kalibriergrenze von 10 mm und sieben Bildern eingehalten werden. Damit ist das rechte Ende des Lineartisches erreicht.

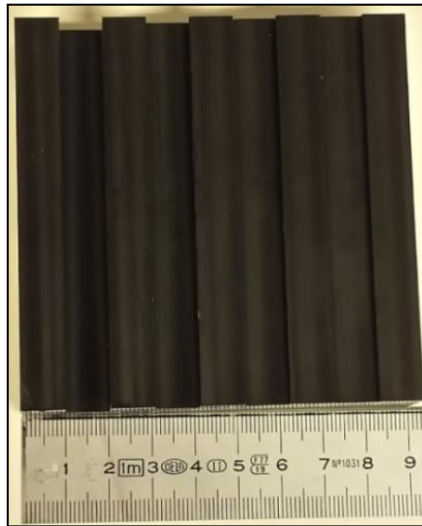
In *Abbildung 88* ist die mögliche x- und y-Ausdehnung der Messobjekte in Abhängigkeit von der z-Richtung dargestellt.



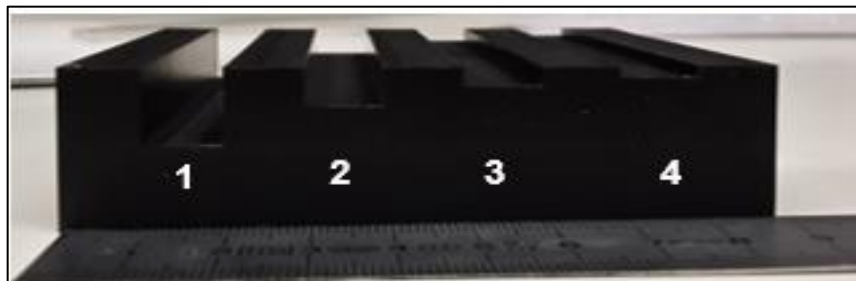
**Abbildung 88: Messvolumen des Streifenprojektionsgeräts**

## 7.11 Festlegung der Auflösungsgrenzen

Um die Auflösungsgrenzen des Streifenprojektionsgerätes zu testen, wurde eine Platte aus Polyoxymethylen (POM) mit vier unterschiedlich tiefen Bahnsuren gefertigt (s. *Abbildung 89*).



**Abbildung 89: POM-Platte mit 4 Bahnsuren**



**Abbildung 90: Seitenansicht der durchnummerierten Bahnsuren**

Die *Abbildung 90* zeigt die durchnummerierten Bahnsuren, beginnend bei der größten Vertiefung (1-4).

Die Platte wurde zunächst mit der Rubinkugel der UPMC Carat 550 von Zeiss 50 Mal angefahren, um die exakten Tiefen der Bahnsuren zu erhalten. Anschließend wurden drei Messwerte ausgewählt: der Messwert in der Mitte der Spur und zwei Messwerte, die an den äußersten Enden erfasst wurden.

Danach erfolgte das Vermessen der Platte mit dem Streifenprojektionsgerät. Für jede Bahnspur wurden drei Messungen durchgeführt.

Das Messsystem wurde vor der Durchführung der Messungen mit folgender Gerätekonfiguration kalibriert:

- Z Step size: 8 mm
- Z Steps: 7 Bilder
- Exposure: -6
- Gain: 0
- Focus: 102
- WhiteBalance 529

Die nachfolgende *Abbildung 91* zeigt eine Gegenüberstellung der Tiefen der Bahnspuren, die mit der UPMC und mit dem Streifenprojektionsgerät erfasst worden sind. Die tabellarischen Ergebnisse befinden sich im *Anhang G* der Arbeit.

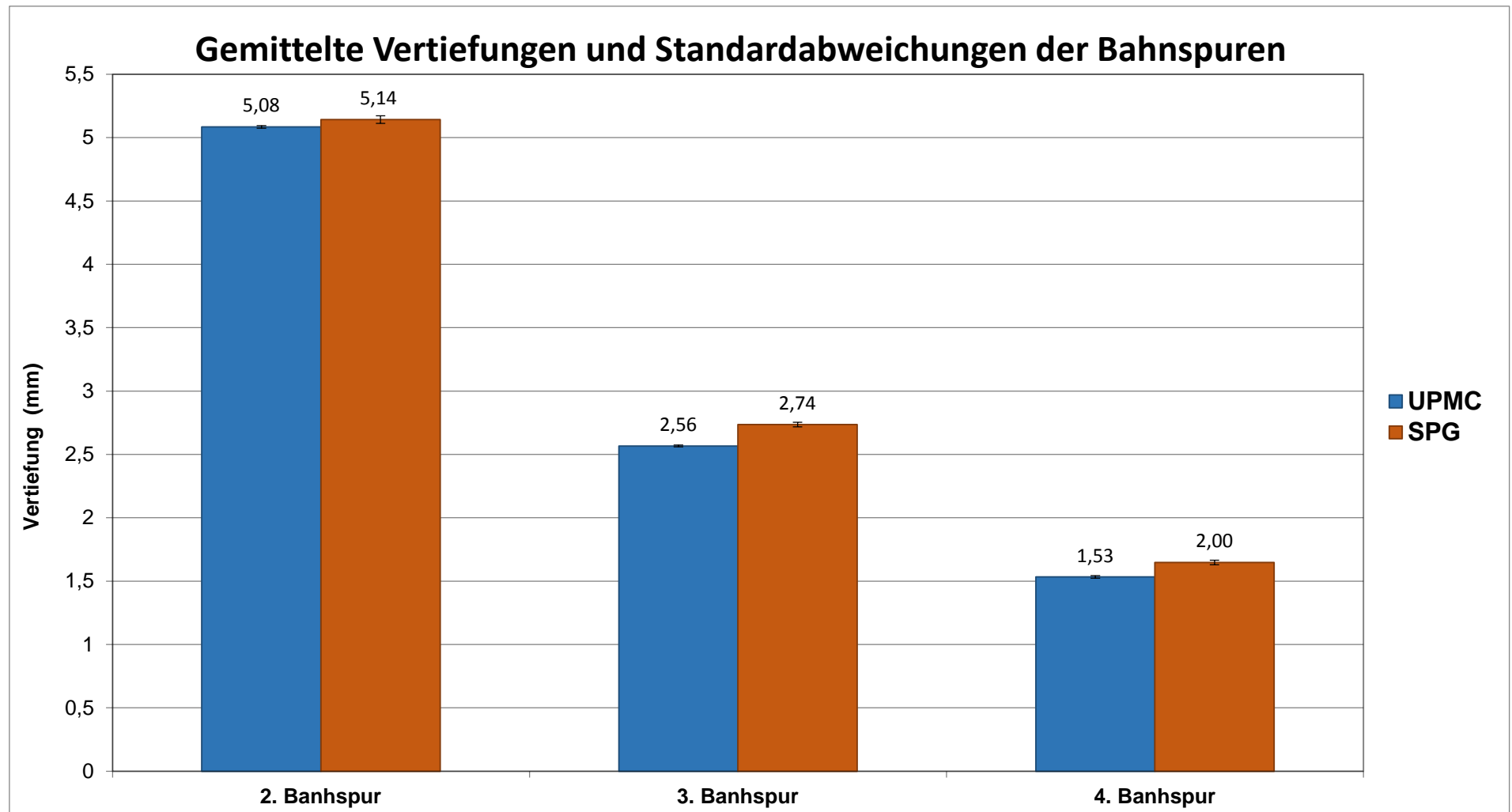


Abbildung 91: Erfasste Vertiefungen der Bahnsuren mit der UPMC und dem SPG

Die Streuung der Werte, die mit der UPMC erfasst worden sind, entsteht dadurch, dass die Bahnspuren nicht exakt gerade sind.

Die Streubreite, die das Streifenprojektionsgerät bei den gemessenen Vertiefungen aufweist, wird desweiteren noch durch die Messgenauigkeit beeinflusst.

Es ist ersichtlich, dass die Bahnspuren 4, 3 und 2 sich mit dem Streifenprojektionsgerät detektieren ließen. Bahnspur 1 hingegen konnte nicht aufgelöst werden, da die Kanten zu hoch sind, somit Schattenränder entstehen und das Streifenprojektionsgerät folglich keine Information an dieser Stelle verwerten kann.

In *Abbildung 92* lässt sich erkennen, dass die Bahnspuren 4 und 3 vom Streifenmuster vollständig bedeckt werden, wohingegen Vertiefung 2 nur noch zur Hälfte detektiert wird. Bahnspur 1 liegt, wie oben schon erwähnt, vollkommen im Schatten.



**Abbildung 92: Streifenmuster auf den vier Bahnspuren**

Mittels der durchgeführten Messungen kann die Schwierigkeit des Streifenprojektionsgerätes in der Detektion scharfer Kanten bewiesen werden. Bahnspuren, die tiefer als 5 mm sind, können nicht mehr aufgelöst werden. Letztendlich lässt sich sagen, dass das Streifenprojektionsgerät für die Vermessung von Vertiefungen mit scharfen Kanten ungeeignet ist.

## 8. Schlussfolgerung

Das Ziel der Bachelorarbeit war es, das selbstentwickelte Streifenprojektionsgerät zu testen und weiterzuentwickeln.

Das Gerät kann durch die vorgenommene Veränderung hinsichtlich der Umwandlung der x- und y-Kalibrierung in metrische Daten, für zukünftige Messungen benutzt werden. Desweiteren konnte die Bedienung des Gerätes benutzerfreundlicher gestaltet werden.

Getestet wurde das selbstentwickelte Gerät auf Reproduzierbarkeit und Messgenauigkeit. Mittels der Durchführung diverser Messungen konnte bewiesen werden, dass es reproduzierbare Ergebnisse liefert. Bezüglich der Messgenauigkeit wurde das Streifenprojektionsgerät durch einige Veränderungen (s. *Punkt 7.8*) verbessert.

Weiterhin konnte festgestellt werden, dass Projektor und Webcam nicht synchron zueinander sind.

Durch eine verbesserte Synchronisation könnte eine höhere Messgenauigkeit erreicht sowie die Auflösung des Gesamtsystems verbessert werden.

Zudem ergeben sich durch den Einsatz dieser Low-End Komponenten weitere Einschränkungen, welche in einer schlechteren Messgenauigkeit resultieren.

Die Untersuchung der Auflösungsgrenzen zeigte, dass das Gerät für das Vermessen von Vertiefungen scharfer, nicht stetiger Kanten ( $> 5\text{mm}$ ) ungeeignet ist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich Objekte mit dem selbstentwickelten Streifenprojektionsgerät nicht mit ausreichender Genauigkeit vermessen lassen um in der Industrie Einsatz zu finden. Dafür sind die Software und der Aufbau zu einfach gehalten.

Das Ausgangsziel, Sollformen für andere messtechnische Geräte (z.B. für die Vermessung mit taktilen Messmaschinen) zu definieren, konnte jedoch erreicht werden. Des Weiteren kann mit Hilfe des Gerätes das Prinzip der Streifenprojektion für die Studierenden in Zukunft besser veranschaulicht werden.

## 9. Literaturverzeichnis

- [1] Prof. Dr. Ing. Schmid, Dietmar: Industrielle Fertigung – Fertigungsverfahren, Mess- und Prüftechnik, 6. überarbeitete Auflage, Haan-Gruiten-Verlag Europa-Lehrmittel, 2013, S. 592-594, S.673, S.680
- [2] Weckenmann A. & Gawande B.: Koordinatenmesstechnik – Flexible Messstrategien für Maß, Form und Lagen, 1. Auflage, Wien/München: Carl Hanser Verlag, 1999, S. 1-3, S.23, S. 50-51
- [3] Tombers Andreas: Arbeit Einsatz der optischen 3D-Messtechnik in der Fertigung von Triebwerksbauteilen, Potenzialabschätzung zur Prüfzeitreduktion, Universität Paderborn 2006
- [4] Messtechnik Neth GmbH, online verfügbar unter <http://www.messtechnik-neth.de/3d-messtechnik/>, Zugriff am 25.05.2015
- [5] Keferstein C.; Dutschke W.: Fertigungsmesstechnik – Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren, 6. Auflage, Wiesbaden: B. G. Teubner Verlag/GWV Fachverlage GmbH, 2008, S.63 –S.68, S.71 - S.74
- [6] Christoph R.; Neumann H.: Die Bibliothek der Technik (Band 248) – Multisensor Koordinatenmesstechnik, 3. Auflage, Freising: Sellier Druck GmbH, 2006, S.11
- [7] Internetauftritt: <http://www.aukom.info/e-learning.html>, Zugriff am 10.03.2015, 15.03.2015
- [8] Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst, Hildesheim, Holzminden, Göttingen,  
Internetauftritt: <http://www2.pmf.fh-goettingen.de/~isimon/RubinKugeln/index.php>, Zugriff am 20.03.2015
- [9] Weckenmann A.: Koordinatenmesstechnik – Flexible Strategien für funktions- und fertigungsgerechtes Prüfen, 2. Auflage, München/Wien: Carl Hanser Verlag, 2012, S. 45
- [10] WinWinTec UG, Internetauftritt: <http://www.winwintec.com/de/products.htm>, Zugriff am 01.06.2015
- [11] Dössel O.; Buzug T.: Biomedizinische Technik - Medizinische Bildgebung, Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH, 2014, S.472
- [12] Pfeiffer T.; Schmitt R.: Fertigungsmesstechnik, 3. Auflage, München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2010, S.300

- [13] Dissertation Zacher M.: Integration eines optischen 3D-Sensors in ein Koordinatenmessgerät für die Digitalisierung komplexer Oberflächen, RWTH Aachen, 2003
- [14] 3D-Shape GmbH, Internetauftritt:  
[http://www.3d-shape.com/up\\_down\\_load/prospekte/KORAD/201103\\_WLI-Info\\_d.pdf](http://www.3d-shape.com/up_down_load/prospekte/KORAD/201103_WLI-Info_d.pdf);  
[http://www.3d-shape.com/produkte/korad\\_d.php](http://www.3d-shape.com/produkte/korad_d.php) (Bild), Zugriff am 02.06.2015
- [15] Internetauftritt: <https://de.wikipedia.org/wiki/Streifenprojektion>, Zugriff am 20.03.2015
- [16] Bauer N.: Handbuch zur industriellen Bildverarbeitung – Qualitätssicherung in der Praxis, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2008, S.216-217]
- [17] Dissertation Gühring J.: 3D-Erfassung und Objektrekonstruktion mittels Streifenprojektion, Universität Stuttgart, 2002
- [18] Diplomarbeit BangeL.: Untersuchung eines Streifenprojektionssystems hinsichtlich der Nutzungsmöglichkeiten für kunsthistorische Objekte, Fachhochschule Bochum, 2007
- [19] Cramer M.: Vorlesungsskript – Grundlagen der Zentralperspektive (Kapitel 5, Kollinearitätsgleichungen), Universität Stuttgart  
Internetauftritt:<http://www.ifp.uni-stuttgart.de/lehre/vorlesungen/photo+gis/100621-PhotoGIS-Kameraorientierung.pdf>, Zugriff am 16.06.2015
- [20] Diplomarbeit Haberjahn M.: Umsetzung eines vollautomatisierten Objekterfassungssystems über Methoden phasengestützter Streifenprojektion und Photogrammetrie
- [21] Luhmann T.: Nahbereichsphotogrammetrie - Grundlagen, Methoden und Anwendungen, 2. Auflage, Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag, Hüthing GmbH & Co. KG, 2003
- [22] Internetauftritt: <http://www.logitech.com/en-us/product/hd-webcam-c615>, Zugriff am 02.06.2015
- [23] Internetauftritt: [http://www.asus.com/de/Monitors\\_Projectors/P1M/overview/](http://www.asus.com/de/Monitors_Projectors/P1M/overview/), Zugriff am 02.06.2015
- [24] Internetauftritt: <http://piceramic.de/produkt-detailseite/m-404-701751.html>, Zugriff am 02.06.2015
- [25] Praxissemesterbericht Geng A.: Streifenprojektion, Hochschule Aalen, 2015
- [26] Dissertation Moll A.: Radarinterferometrische Untersuchungen mit ERS-1/2 auf der antarktischen Halbinsel, Universität Bonn, 2007
- [27] Krystek M.: Berechnung der Messunsicherheit – Grundlagen und Anleitung für die praktische Anwendung, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2012, S. 24



## 10. Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Roboterlabor ZOT .....</i>	<i>1</i>
<i>Abbildung 2: Messlabor ZOT .....</i>	<i>1</i>
<i>Abbildung 3: Zeitplan .....</i>	<i>5</i>
<i>Abbildung 4: Aufbau KMG in Portalbauweise [7].....</i>	<i>7</i>
<i>Abbildung 5: Taktile Messkopf bei messendem System[5] .....</i>	<i>8</i>
<i>Abbildung 6: Einmessung des Tasters an der Kugelnormalen [7] .....</i>	<i>9</i>
<i>Abbildung 7: Mechanische Filterung des Antastelements [9] .....</i>	<i>10</i>
<i>Abbildung 8: Aufbau des Weißlichtinterferometers Zygo.....</i>	<i>11</i>
<i>Abbildung 9: Prinzip Weißlichtinterferometer [14].....</i>	<i>12</i>
<i>Abbildung 10: Triangulationsprinzip [16] .....</i>	<i>15</i>
<i>Abbildung 11: Prinzipien der aktiven Triangulation mit strukturierter Beleuchtung [17].....</i>	<i>15</i>
<i>Abbildung 12: Parameter der inneren Orientierung [19] .....</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 13: Parameter der äußeren Orientierung [19].....</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 14: Streifenmuster jeweils 4x um 90 Grad verschoben [20].....</i>	<i>18</i>
<i>Abbildung 15: Streifenprojektionsaufbau.....</i>	<i>20</i>
<i>Abbildung 16: Webcam C615 von Logitech [22].....</i>	<i>20</i>
<i>Abbildung 17: Projektor P1M von Asus [23].....</i>	<i>21</i>
<i>Abbildung 18: Black Box.....</i>	<i>21</i>
<i>Abbildung 19: Linearachse mit Mikrostelltisch [24].....</i>	<i>22</i>
<i>Abbildung 20: Referenz-/Kalibrierplatte aus Edelstahl.....</i>	<i>22</i>
<i>Abbildung 21: Objektträger .....</i>	<i>23</i>
<i>Abbildung 22: Aufbau der GUI, rot: Steuerung von Lineartisch (links) und Parameter für metrische Kalibrierung (rechts), grün: Parameter zur Steuerung der Streifenprojektion, blau: Parameter zur Steuerung der Webcam.....</i>	<i>24</i>
<i>Abbildung 23: Einstellungsparameter der Kamera in Grundeinstellung.....</i>	<i>25</i>
<i>Abbildung 24: Livebild-Fenster.....</i>	<i>26</i>
<i>Abbildung 25: Steuerung des Lineartischs (rot) und Parameter für Kalibrierung (blau) .....</i>	<i>26</i>
<i>Abbildung 26: Fahrweg des motorischen Lineartischs .....</i>	<i>27</i>
<i>Abbildung 27: Steuerzentrum der Streifenprojektion .....</i>	<i>28</i>
<i>Abbildung 28: Schematischer Programmablauf der Streifenprojektion [25].....</i>	<i>29</i>

---

Abbildung 29: Phase Unwrapping .....	31
Abbildung 30: Auswahl des "Change Folder" Buttons .....	32
Abbildung 31: Streifenmuster in "Figure 11" .....	33
Abbildung 32: Oter Streifen in "Figure 10" .....	33
Abbildung 33: Pfeiltasten .....	33
Abbildung 34: Optimale Einstellung der Kameraparameter .....	34
Abbildung 35: Optimal belichtetes Streifenbild .....	35
Abbildung 36: Überbelichtetes Streifenbild .....	35
Abbildung 37: Unterbelichtetes Streifenbild .....	35
Abbildung 38: Auswahl Arbeitsbereich .....	36
Abbildung 39: Ausgewählter Arbeitsbereich in X-Y-Richtung .....	36
Abbildung 40: Ausgewählter Arbeitsbereich in X-Z-Richtung .....	37
Abbildung 41: Richtige Positionierung des Arbeitsbereiches in „Figure 10“ .....	38
Abbildung 42: Parameter der Kalibrierungseinstellung .....	38
Abbildung 43: Streifen außerhalb des Arbeitsbereiches .....	39
Abbildung 44: Buttons zur Erzeugung eines Referenzbildes .....	39
Abbildung 45: Optimale Ausrichtung des Messobjekts zur Kamera .....	40
Abbildung 46: Buttons zur Erzeugung eines Objektbildes .....	41
Abbildung 47: $b$ in Abhängigkeit von $z_n$ .....	44
Abbildung 48: Grafische Darstellung - $b$ in Abhängigkeit von $z_n$ .....	45
Abbildung 49: Beispiel für drei Bilder an unterschiedlichen $z$ -Positionen .....	45
Abbildung 50: $A \times p$ .....	47
Abbildung 51: Beispiel für den ersten Pixel .....	47
Abbildung 52: Matrix $A$ .....	47
Abbildung 53: Transponierte Matrix $A'$ .....	47
Abbildung 54: Referenz-/Kalibrierplatte zur Bestimmung des $x$ -/ $y$ -Abstands in mm .....	51
Abbildung 55: Stellen im Matlab Quellcode, an denen die gemessenen $x$ - und $y$ -Werte eingetragen werden .....	51
Abbildung 56: "Push Button" zum Start der $x$ -/ $y$ -Kalibrierung .....	52
Abbildung 57: Beispiel für die Verteilung des $x_1$ -Wertes .....	53
Abbildung 58: Schematische Darstellung von $t_1$ .....	53
Abbildung 59: Schematische Darstellung der Variablen $A$ .....	53

Abbildung 60: Schematische Darstellung der transponierten Variablen A'	53
Abbildung 61: Messobjekt Sekundäroptik	57
Abbildung 62: Erfasste Oberfläche mit SPG in Falschfarbendarstellung; rot = hoch, blau = tief	57
Abbildung 63: Oberfläche vermessen mit der UPMC Carat 550 Falschfarbendarstellung	58
Abbildung 64: Ausgewählte Werte für die Kalibriereinstellung	59
Abbildung 65: Mittelwert der PV-Werte der vier Kalibrierbereiche	60
Abbildung 66: Mittelwert RMS-Werte der vier Kalibrierbereiche	60
Abbildung 67: Erstes Messergebnis der Asphäre	62
Abbildung 68: Mittelwert von 1706,2 $\mu\text{m}$ und Standardabweichung von 1,5 $\mu\text{m}$ der RMS- Werte der 20 Messungen	62
Abbildung 69: Mittelwert von 7212,9 $\mu\text{m}$ und Standardabweichung von 1,7 $\mu\text{m}$ der PV-Werte der 20 Messungen	63
Abbildung 70: Asphäre mit grünem Markierungspunkt	64
Abbildung 71: Erste Messung der Asphäre in der Ausgangsposition	65
Abbildung 72: Messergebnis der zugeschnittenen Asphäre	65
Abbildung 73: Mittelwert von 6323,5 $\mu\text{m}$ und Standardabweichung von 33,4 $\mu\text{m}$ der PV- Werte der acht Messungen	66
Abbildung 74: "Planes" Messobjekt	67
Abbildung 75: Erstes Messergebnis der Oberfläche, gemessen mit dem WLI	68
Abbildung 76: Unbearbeiteter Objektausschnitt des Messobjekts	69
Abbildung 77: Zugeschnittene Oberfläche des Messobjektes	69
Abbildung 78: Gemittelter RMS-Wert der Messungen mit dem WLI (Standardabweichung 0,688 $\mu\text{m}$ ) und dem SPG (Standardabweichung 0,56 $\mu\text{m}$ )	70
Abbildung 79: "Neuer" gemittelter RMS-Wert der Messungen mit dem WLI (Standardabweichung 0,688 $\mu\text{m}$ ) und dem SPG (Standardabweichung 0,47 $\mu\text{m}$ )	72
Abbildung 80: Messobjekt DMG-Asphäre	73
Abbildung 81: Erfasste Oberfläche der DMG-Asphäre mit UPMC; PV-Wert 3633,01 $\mu\text{m}$	73
Abbildung 82: Erfasste Oberfläche der DMG-Asphäre mit SPG; PV-Wert 3166,97 $\mu\text{m}$	74
Abbildung 83: Resultierende Restfläche nach Abziehen; PV-Wert 1077,14 $\mu\text{m}$	75
Abbildung 84: Mittlerer PV-Wert der Messungen; Edelstahlplatte Standardabweichung 0,43 $\mu\text{m}$ und Glasplatte 0,44 $\mu\text{m}$	76

<i>Abbildung 85: Mittlerer RMS-Wert der Messungen; Edelstahlplatte Standardabweichung 0,17 <math>\mu\text{m}</math> und Glasplatte 0,22 <math>\mu\text{m}</math>.....</i>	<i>77</i>
<i>Abbildung 86: Abgetastete Messfelder mit der UPMC Carat 550 von Zeiss .....</i>	<i>77</i>
<i>Abbildung 87: Messergebnisse der Glasplatte .....</i>	<i>78</i>
<i>Abbildung 88: Messvolumen des Streifenprojektionsgeräts .....</i>	<i>79</i>
<i>Abbildung 89: POM-Platte mit 4 Bahnspuren.....</i>	<i>80</i>
<i>Abbildung 90: Seitenansicht der durchnummerierten Bahnspuren.....</i>	<i>80</i>
<i>Abbildung 91: Erfasste Vertiefungen der Bahnspuren mit der UPMC und dem SPG.....</i>	<i>82</i>
<i>Abbildung 92: Streifenmuster auf den vier Bahnspuren .....</i>	<i>83</i>

## **11. Anhang**

<b>Anhang A</b>	<b>Quellcode Matlab</b>
<b>Anhang B</b>	<b>Messergebnisse bei unterschiedlichen Kalibriereinstellungen</b>
<b>Anhang C</b>	<b>Messergebnisse der Wiederholmessung</b>
<b>Anhang D</b>	<b>Messergebnisse der Reproduzierbarkeitsmessung</b>
<b>Anhang E</b>	<b>Messergebnisse Messgenauigkeitsuntersuchung</b>
<b>Anhang F</b>	<b>Messergebnisse des Plattenvergleichs</b>
<b>Anhang G</b>	<b>Messergebnisse Bestimmung der Auflösungsgrenzen</b>

## Anhang A Quellcode Matlab

### Bestimmung der Koeffizienten

```
function [an] = bilderreihe_interf(handles)

    anzahl_bilder=handles.zsteps_wert;
    z_step_size=handles.zstepsize_wert;
    z_tisch_auslenkung=(anzahl_bilder-1)/2*z_step_size;

    tischkorrektur=1/(1.4832/2);

    handles.PIAxes.MoveIAxisRelative(int32(0), 'A', z_tisch_auslenkung*.1*tischkorrektur);

    % cam_onoffcheck(handles.vid)

    reply = input('Arbeitsbereich selbst eingeben? Y/N [Y]:','s');
    if isempty(reply)
        pos=handles.position;
    else
        pos=input('pos = ');
    end

    res=handles.vid.VideoResolution;
    bild=zeros(res(2),res(1),4);
    streifen =zeros(res(2),res(1));
    W=zeros(res(2),res(1),anzahl_bilder);
    W(:)=nan;

    pause(.1*(anzahl_bilder-1)/2)

    for bild_nr=1:anzahl_bilder

        bild_nr

        figure(10);
        pause(.4)
        streifen=shot(handles,[0 1 0]);

    for bild_nr=1:anzahl_bilder

        bild_nr

        figure(10);
        pause(.4)
        streifen=shot(handles,[0 1 0]);

        figure(11);
        for i=0:3

            image(streifen(handles,i*2*pi/4))
            pause(.4);
            bild(:,i,i+1)=shot(handles,[0 1 0]);

        end

        Q=qualitaet(atan((bild(:,i,4)-bild(:,i,2))./(bild(:,i,3)-bild(:,i,1))));
        [bild]=calcPSI90GradLeastSquares(bild);
        [Wm,Q_slim]=minimum_discontinuity_algorithm(bild(pos(1):pos(2),pos(3):pos(4),:),Q(pos(1):pos(2),pos(3):pos(4)),8);
        [x] = bloecke_angleichen(Wm,Q_slim);
        [W(pos(1):pos(1)+size(x,1)-1,pos(3):pos(3)+size(x,2)-1,bild_nr)]=x;

        W(:,i,bild_nr)=W_Mitte_zur_Linie(streifen,W(:,i,bild_nr),pos);
        fprintf(1,'zum Strich geführt\n');

        if(bild_nr<anzahl_bilder)
            handles.PIAxes.MoveIAxisRelative(int32(0), 'A', -z_step_size*.1*tischkorrektur);
        end

    end

end
```

```
handles.PIAxes.Move1AxisRelative(int32(0), 'A', z_tisch_auslenkung*.1*tischkorrektur);

[y,x]=find(~isnan(sum(W,3)));
[Wok]=find(~isnan(sum(W,3)));

figure;
hold on;
for i=1:size(W,3)
    Wtemp=W(:, :, i);
    scatter3(x(1:1000:end), y(1:1000:end), Wtemp(Wok(1:1000:end)))
end

z0=((1:anzahl_bilder)-1)-(anzahl_bilder-1)/2*z_step_size;
z0=z0';

p=0:2;
Ar=zeros(size(Wok,1),size(p,2),anzahl_bilder);
for i=1:anzahl_bilder
    W_temp=W(:, :, i);
    [~,Ar(:, :, i)]=meshgrid(1:size(p,2),W_temp(Wok));
end

p=meshgrid(p,1:size(Wok,1));

for i=1:anzahl_bilder
    Ar(:, :, i)=Ar(:, :, i).^p;
end

an=nan(size(W,1),size(W,2),size(p,2));

for m=1:size(y,1)
    A=reshape(Ar(m, :, :), size(p,2), anzahl_bilder)';
    an(y(m), x(m), :)=(A'*A)\(A')*z0;
end

for i=1:size(an,3)
    an(:, :, i)=bild2tscheb(an(:, :, i));
end
```

## Bestimmung der x-Kalibrierung

```
function [Un] = x_calib(handles)
anzahl_bilder=str2num(get(handles.zsteps, 'string'));
z_step_size=str2num(get(handles.zstepsize, 'string'));
z_tisch_auslenkung=(anzahl_bilder-1)/2*z_step_size;

tischkorrektur=1/(1.4832/2);

handles.PIAxes.Move1AxisRelative(int32(0), 'A', z_tisch_auslenkung*.1*tischkorrektur);

% cam_onoffcheck(handles.vid)

pos=handles.position;

res=handles.vid.VideoResolution;
bild=zeros(res(2),res(1));

M=zeros(2,anzahl_bilder);
x_streifen=zeros(1,anzahl_bilder);

pause(.1*(anzahl_bilder-1)/2)

for bild_nr=1:anzahl_bilder
    pause(.4)

    bild=shot(handles,[0 1 0]);
    pos=handles.position;
    M_temp=find_n_circles_main(bild,pos);
    dx=M_temp(1,2)-M_temp(1,1);
    dy=M_temp(2,2)-M_temp(2,1);
    M(:, bild_nr)=[dx;dy];
    %z0(bild_nr)=((bild_nr-1)-(anzahl_bilder-1)/2)*z_step_size;

    % xy_beschnitten=find_line(bild(pos(1):pos(2),pos(3):pos(4)),[]);
    % xy(:,1)=xy_beschnitten(:,1)+pos(3);
    % x_streifen(1,bild_nr)=mean(xy(:,1));

    if(bild_nr<anzahl_bilder)
        handles.PIAxes.Move1AxisRelative(int32(0), 'A', -z_step_size*.1*tischkorrektur);
    end
end
```

```

handles.PIAxes.Move1AxisRelative(int32(0), 'A', z_tisch_auslenkung*.1*tischkorrektur);

[MM,NN]=size(bild);
[y,x]=meshgrid(1:10:MM,1:10:NN,1:anzahl_bilder);

]for i=1:anzahl_bilder
    x(:,:,i)=x(:,:,i)./(x(:,:,i)*((92.37)/M(1,i))); %70/M in mmpp
    y(:,:,i)=y(:,:,i)./(y(:,:,i)*((74.06)/M(2,i)));
-end

t1(:,1)=reshape(x,numel(x),1);
t1(:,2)=reshape(y,numel(y),1);

[y,x]=meshgrid(1:10:MM,1:10:NN,1:anzahl_bilder);

]for i=1:anzahl_bilder
    x(:,:,i)=-1./((x(:,:,i)*((92.37)/M(1,i)))); %70/M in mmpp
    y(:,:,i)=-1./((y(:,:,i)*((74.06)/M(2,i))));
-end

t2(:,1)=reshape(x,numel(x),1);
t2(:,2)=reshape(y,numel(y),1);

[y,x]=meshgrid(1:10:MM,1:10:NN,1:anzahl_bilder);

]for i=1:anzahl_bilder
    x(:,:,i)=1;
    y(:,:,i)=1;
-end

t3(:,1)=reshape(x,numel(x),1);
t3(:,2)=reshape(y,numel(y),1);

z0=((1:anzahl_bilder)-1)-(anzahl_bilder-1)/2)*z_step_size;

Z=meshgrid(z0,1:size(x,1)*size(x,2));

Z=reshape(Z,numel(Z),1);

]for i=1:size(t1,2)
    A(:,:,i)=[t1(:,i) t2(:,i) t3(:,i)];
-end

for i=1:size(A,3)
    At=A(:, :, i);
    Un(:, i) = (At' * At) \ (At') * Z;
end

end

```



**Anhang B Messergebnisse bei unterschiedlichen Kalibriereinstellungen**

**Tabelle 1:** Einfluss unterschiedlicher Kalibriereinstellungen auf den PV-Wert

Kalibriereinstellung	1. Messung ( $\mu\text{m}$ )	2. Messung ( $\mu\text{m}$ )	3. Messung ( $\mu\text{m}$ )	Standardabweichung ( $\mu\text{m}$ )	Mittelwert ( $\mu\text{m}$ )
1	656,5	658,9	651,2	3,93	655,53
2	555	554,1	554,2	0,49	554,43
3	514,5	513,4	518,9	2,912	515,6
4	498,1	500,2	500,6	1,34	499,63

**Tabelle 2:** Einfluss unterschiedlicher Kalibriereinstellungen auf den RMS-Wert

Kalibriereinstellung	1. Messung ( $\mu\text{m}$ )	2. Messung ( $\mu\text{m}$ )	3. Messung ( $\mu\text{m}$ )	Standardabweichung ( $\mu\text{m}$ )	Mittelwert ( $\mu\text{m}$ )
1	80,3	80,4	80,9	0,32	80,53
2	76,2	76,5	76,1	0,20	76,26
3	74,1	74,9	75,2	0,56	74,73
4	73,3	73,5	73,6	0,15	73,46

## Anhang C Messergebnisse der Wiederholbarkeitsmessung

**Tabelle 3:** PV- und RMS-Werte der Wiederholbarkeitsmessung mit Ausreißer (rot)

Messungen	PV( $\mu\text{m}$ )	RMS( $\mu\text{m}$ )
1	7215,6	1705,2
2	7210,3	1706,6
3	7212,2	1705,4
4	7211,1	1705,6
5	7212,5	1706,2
6	7213	1704
7	7214,6	1706,2
8	7214,2	1708,5
9	7210,9	1703,2
10	7211,2	1707,4
11	7213,2	1704,3
12	7210,6	1706,1
13	7190,3	1680,2
14	7216	1704,9
15	7213,5	1708,5
16	7214,1	1706
17	7215,4	1705,5
18	7213,1	1708,6
19	7212,9	1708,2
20	7212,1	1707,1
Mittelwert	7212,97	1706,18
Standardabweichung	1,71	1,57

## Anhang D Messergebnisse der Reproduzierbarkeitsmessung

**Tabelle 4:** PV-Werte der Reproduzierbarkeitsmessung

Messungen	PV ( $\mu\text{m}$ )
1. Messung (90°)	6322
2. Messung (45°)	6316
3. Messung (0°)	6279
4. Messung (315°)	6365
5. Messung (270°)	6332
6. Messung (225°)	6329
7. Messung (180°)	6278
8. Messung (135°)	6367
Mittelwert	6323,5
Standardabweichung	33,43

## Anhang E Messergebnisse Messgenauigkeitsuntersuchung

**Tabelle 5:** RMS-Werte der Messungen mit dem Weißlichtinterferometer

Messungen	RMS ( $\mu\text{m}$ )
1. Messung	4,432
2. Messung	2,886
3. Messung	3,349
4. Messung	4,059
5. Messung	4,109
6. Messung	4,285
7. Messung	3,212
8. Messung	3,053
9. Messung	3,053
10. Messung	3,025
11. Messung	2,526
12. Messung	3,811
13. Messung	4,653
14. Messung	2,992
15. Messung	4,489
16. Messung	4,532
17. Messung	4,281
18. Messung	2,772
19. Messung	3,157
20. Messung	3,813
<b>Mittelwert</b>	3,62
<b>Standardabweichung</b>	0,68

**Tabelle 6:** RMS-Werte der ersten Messungen mit dem Streifenprojektionsgerät

Messungen	RMS ( $\mu\text{m}$ )
1. Messung	124,44
2. Messung	125,67
3. Messung	126
4. Messung	124,15
5. Messung	125,4
6. Messung	124,88
7. Messung	125,1
8. Messung	125,59
9. Messung	124,91
10. Messung	125,11
<b>Mittelwert</b>	125,125
<b>Standardabweichung</b>	0,56

**Tabelle 7:** RMS-Werte der zweiten Messungen mit dem Streifenprojektionsgerät

Messungen	RMS ( $\mu\text{m}$ )
1. Messung	51,9
2. Messung	52,3
3. Messung	52,8
4. Messung	51,5
5. Messung	52,3
6. Messung	52,45
7. Messung	52,22
8. Messung	51,45
9. Messung	52,65
10. Messung	51,68
<b>Mittelwert</b>	52,125
<b>Standardabweichung</b>	0,47

## Anhang F Messergebnisse des Plattenvergleichs

**Tabelle 8:** PV-Werte der Messungen des Plattenvergleichs

Messungen	Edelstahlplatte ( $\mu\text{m}$ )	Glasplatte ( $\mu\text{m}$ )
1. Messung	411,7	381,1
2. Messung	411,9	381,9
3. Messung	411,1	380,9
4. Messung	412,1	381,5
<b>Mittelwert</b>	411,7	381,35
<b>Standardabweichung</b>	0,43	0,44

**Tabelle 9:** RMS-Werte der Messungen des Plattenvergleichs

Messungen	Edelstahlplatte ( $\mu\text{m}$ )	Glasplatte ( $\mu\text{m}$ )
1. Messung	61,1	59,5
2. Messung	60,9	59,3
3. Messung	61,2	59,1
4. Messung	61,3	59,6
<b>Mittelwert</b>	61,125	59,375
<b>Standardabweichung</b>	0,17	0,22

**Anhang G Messergebnisse Bestimmung der Auflösungsgrenzen**

**Tabelle 10:** Gemessene Vertiefungen der Bahnspuren mit dem Streifenprojektionsgerät

Bahnspur	1. Messung (mm)	2. Messung (mm)	3. Messung (mm)	Standardabweichung (mm)	Mittelwert (mm)
1	-	-	-	-	-
2	5,15	5,2	5,08	0,06	5,14
3	2,77	2,74	2,7	0,03	2,73
4	1,68	1,61	1,65	0,03	1,64

**Tabelle 11:** Gemessene Vertiefungen der Bahnspuren mit der UPMC Carat 550 von Zeiss

Bahnspur	1. Äußere Grenze (mm)	Mitte (mm)	2. Äußere Grenze (mm)	Standardabweichung (mm)	Mittelwert (mm)
1	10,062	10,077	10,061	0,0089	10,06
2	5,079	5,108	5,067	0,021	5,08
3	2,557	2,581	2,561	0,012	2,56
4	1,523	1,556	1,522	0,019	1,53